

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Журнал заснований у 1918 році

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 37 (76) № 3 2026

Частина 2



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович, доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна

Члени редакційної колегії:

Бронін Сергій Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», Україна;

Гуйда Олександр Григорович, кандидат наук з державного управління, професор, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна;

Лисенко Олександр Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна;

Лісовець Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерних систем та технологій Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна;

Медведєв Микола Георгійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерних систем та технологій, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна;

Олещенко Любов Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна;

Скуратовський Руслан Вячеславович, кандидат технічних наук, доцент, докторант, Інститут математики НАН України, Україна;

Alexandr Neftissov, PhD, Associate Professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Kazakh National University of Sports, Kazakhstan;

Andreas Pester, Dr.phil.habil., Professor, Professor at the Faculty of Informatics and Computer Science, British University of Egypt, Egypt;

Danielienė Renata, Dr., Associate Professor, Associate Professor of the Institute of Social Sciences and Applied Information, Vilnius University, Lithuania.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 11 від 5 травня 2026 року).**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»
zareєстровано відповідно до Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 1136 від 11.04.2024 року.

Ідентифікатор медіа: R30-04000.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського
(просп. Берестейський, 10, м. Київ, 01135, e-mail: crimea.tnu@gmail.com, тел.: +38 (044) 529-05-16).

Мови видання: українська, англійська, польська, німецька,
французька, словацька, румунська, італійська.

Періодичність: 6 разів на рік.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук
(спеціальності: G1 Хімічні технології та інженерія; G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією); G5 Електроніка,
електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України
від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), F2 Інженерія програмного забезпечення; F6 Інформаційні системи і технології;

F7 Комп'ютерна інженерія; G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка;
D3 Менеджмент; G11 Машинобудування (за спеціалізаціями); J5 Морський та внутрішній водний транспорт;
J6 Авіаційний транспорт; J7 Залізничний транспорт; J8 Автомобільний транспорт
відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International
(Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2026

ЗМІСТ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Подиман Г.С.

ЦИРКУЛЯЦІЯ ПОВІТРЯ ВСЕРЕДИНИ ПОЛІМЕРНОЇ ТРУБИ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ.....1

Рубанка М.М., Дворжак В.М., Залюбовський М.Г., Ничеглод В.В., Дроменко В.Б.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ОБЕРТОВИХ МАС НА ВАЛУ РОТОРА РОТОРНОЇ ДРОБАРКИ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ.....8

Рудасьов В.Б., Головіна О.В., Якубовський О.М.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ПРИ ШТАМПУВАННІ ТОНКОЛИСТОВИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ І ЙОГО ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК З ВЛАСТИВОСТЯМИ МАТЕРІАЛУ.....15

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Стратонов В.М.

ПРОБЛЕМИ МІЖСУБ'ЄКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ У СИСТЕМІ «ПЛІТ-ДИСПЕТЧЕР-РЯТУВАЛЬНИК» ПІД ЧАС ПОЖЕЖ НА ПОВІТРЯНИХ СУДНАХ.....26

Younis B.N.

FINITE ELEMENT MODELLING OF LAYERED COMPOSITE PANELS FOR AEROSPACE STRUCTURES: MESH SENSITIVITY, BOUNDARY CONDITIONS, AND BUCKLING BEHAVIOUR UNDER COMBINED LOADING..... 33

КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

Казарєзов А.Я.

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМОГО ПІДХОДУ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ АВТОНОМНОЇ ПІДВОДНОЇ ТЕХНІКИ З БУКСИРУВАННЯМ РАДІОБУЄМ.....40

Казимиренко Ю.О., Грудініна Г.С.

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЄКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ КОРПУСІВ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ.....45

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Максисько О.Р.

ОСНОВИ РОЗУМНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ 50

Троценко Є.О., Нестерко А.Б., Проценко О.Р., Перетятко Ю.В.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОРОННИХ РОЗРЯДІВ НА ДОСТОВІРНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ РОЗРЯДІВ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ВИСОКОЇ НАПРУГИ..... 59

ПРИЛАДИ

Гайдай Г.Ю., Грєшнов А.Ю.

АВТОМАТИЗОВАНА МОБІЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТОЧНОСТІ ПОВІРОЧНИХ ПЛИТ.....67

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Гуржій С.В.

АСПЕКТИ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ КООРДИНАЦІЇ UAV/UGV В УМОВАХ РАДІОЧАСТОТНИХ ПЕРЕШКОД.....73

Катін П.Ю., Яценко Д.В., Мішин О.В.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСОВИХ ЗАТРИМОК ПЕРЕДАЧІ ТА ОБРОБКИ GNSS-ДАНИХ У РІЗНИХ ФОРМАТАХ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ ІОТ..... 80

Мовчан К.О.

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У СТВОРЕННІ АДАПТИВНИХ ПРОТОКОЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ТАКТИЧНИХ МЕРЕЖ UAV ТА UGV..... 88

Морщавка С.В., Бугрова Т.І., Чорнобородов М.П., Логачова Л.М., Самойлик С.С. МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКРИТТЯ РАДІОМЕРЕЖ З ЗАСТОСУВАННЯМ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ТА ДЕКОМПОЗИЦІЙНОГО ПІДХОДУ НА БАЗІ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ.....	96
Середа С.С., Кравченко П.О. МЕТОДИ БЕЗДРОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ МІЖ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ РОЮ.....	103
Сколець С.С., Кравчук С.О. ВПЛИВ МЕХАНІЗМІВ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОГО СЕГМЕНТА НА E2E-QOS МОБІЛЬНОГО ТРАФІКУ В МЕРЕЖАХ 4G/5G.....	110
Судаков Є.В., Сокол Г.В. МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ СЕРЕДНЬОЇ ЗАТРИМКИ ПАКЕТІВ У МЕРЕЖАХ З МІМО-ТЕХНОЛОГІСЮ ТА ВИПАДКОВИМ ДОСТУПОМ.....	118

ЕНЕРГЕТИКА

Алфімов Є.Б. ОПЕРАТИВНЕ МАНЕВРУВАННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ У ДОБОВОМУ БАЛАНСУВАННІ НА ФОНІ СОЛЯЧНО-ВІТРОВОЇ ГЕНЕРАЦІЇ.....	124
Беднарська І.С., Ліщук С.Р. ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ОБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОБЛОКУ ТЕЦ У ПІСЛЯРЕМОНТНИЙ ПЕРІОД.....	132
Еуубова К. COMPARATIVE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF DIFFERENT TYPES OF HEAT EXCHANGERS.....	137
Klymenko V.M., Avdieieva O.P., Usatiy O.P. MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF GAS TURBINE BLADE MATERIALS BASED ON LIFE CYCLE ASSESSMENT: INTEGRATING ECONOMIC, ENVIRONMENTAL, AND PERFORMANCE METRICS.....	144
Лавріщев О.О., Новосилецький Ю.Л., Логвінов Г.С. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ РІЗНИХ ТИПІВ В УМОВАХ ЗМІННОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	151
Рачинський А.Ю., Баранюк О.В., Онисько А.І., Пікенін О.О. МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОТЛІ ДКВР-10-13 ПРИ СПАЛЮВАННІ БІОГЕННОГО ПАЛИВА НА ЗМІННИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ.....	156
Тортіка Д.М. ТЕРМООБРОБКА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ФУНКЦІОНАЛЬНО- ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ВИКОРИСТАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВАННЯ.....	165

МЕТАЛУРГІЯ

Бармін О.Є. ВПЛИВ ВОЛЬФРАМУ НА ЗЕРЕННУ СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА.....	171

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Єфіменко О.В. ВИЗНАЧЕННЯ КОМПОНЕНТНОГО СКЛАДУ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БІОМЕТАНУ ХРОМАТОГРАФІЧНИМ МЕТОДОМ.....	177
Коваль М.Г., Ящук Л.Б. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЇ ВИТРАТ ПРЯМИХ БАРВНИКІВ ПРИ РЕЦИКЛІНГУ КОНЦЕНТРОВАНОЇ СТІЧНОЇ ВОДИ В ПРОЦЕСІ ФАРБУВАННЯ БАВОВНЯНИХ ТКАНИН.....	187
Нестеренко М.Б. ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ (ВАПНЯКУ ТА ПІСКУ) НА ФОРМУВАННЯ ПОРОВОЇ СТРУКТУРИ ТА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ.....	197

Румянцева М.О., Мисов О.П., Савченко М.А. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ КРЕМНЕЗЕМУ СІРЧАНОКИСЛОТНИМ СПОСОБОМ (ЧАСТИНА II).....	203
Смірнов Д.О., Ушаков Д.Р. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ ЦЕМЕНТНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АЛЮМІНАТІВ І ЦИРКОНАТІВ БАРИЮ.....	210
Фролова Л.А., Салтиков Д.Ю., Мандрика А.Г., Фролов О.О. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СИНТЕЗУ НА МІКРОХВИЛЬОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОБАЛЬТОВОГО ФЕРИТУ.....	218

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Kramarenko D.P., Hirenko N.I. DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF EVAPORATION OF A LIQUID FOOD MEDIUM UNDER NON-STATIONARY CONDITIONS.....	227

ТРАНСПОРТ

Вільшанюк М.С. ЛОГІСТИЧНІ АСПЕКТИ ЕКСПОРТУ ЗЕРНА: ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ДОСТАВКИ.....	234
Гільдєєв Д.О., Онищенко С.П. КОНЦЕПЦІЯ ВРАХУВАННЯ ВИКИДІВ ПРИ ФОРМУВАННІ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ.....	239
Єсєв А.І. МОДЕРНІЗАЦІЯ РЯТУВАЛЬНИХ ШЛЮПОК З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	245
Жук М.М., Півторак Г.В., Скиба М.Б. ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ ПОПИТУ НА ПЕРЕМІЩЕННЯ З МЕТОЮ ПОКУПОК (НА ПРИКЛАДІ ЛЬВОВА).....	252
Кириллова В.Ю., Кириллова О.В. ТРИАДНА КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ РОЗВИТКУ ПОРТОВИХ СИСТЕМ: SMART PORT, PUBLIC – PRIVATE PARTNERSHIP, PEOPLE – PLANET – PROFIT.....	258
Коваленко Н.О. ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЦИФРОВІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ АВІАЦІЙНОЮ ДІЯЛЬНІСТЮ: ІНЖЕНЕРНО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ТА ІНЖИНІРИНГОВІ РІШЕННЯ.....	269
Колодненко В.М., Таценко О.В., Волошко Т.П., Руденко В.А., Решетіло С.О. ЛОГІСТИЧНІ РИЗИКИ МІЖНАРОДНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА ШЛЯХИ ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ.....	275
Решетков Д.М., Павлова Н.Л. ПРОБЛЕМИ ПЕРЕВАНТАЖЕНОСТІ МОРСЬКИХ ПОРТІВ.....	280
Соколова О.Є., Борець І.В. БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ВАНТАЖІВ В АЕРОПОРТОВОМУ ВУЗЛІ ІНТЕГРОВАНОЇ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ	288
Томчаковський Г.Г., Кучеренко Н.В., Капочкіна М.Б. МІНЛИВІСТЬ ЛІТНЬОГО МУСОНУ В АРАВІЙСЬКОМУ МОРІ.....	297
Фоменко Г.Р. РОЗВИТОК РОЗУМНИХ МІСТ – ШЛЯХ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЖИТТЯ.....	307

ЕЛЕКТРОНІКА

Макаренко В.В. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЗВ'ЯЗАНИХ КОТУШОК ІНДУКТИВНОСТІ В DC/DC-ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ЕНЕРГІЇ.....	313
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	319

CONTENTS

INDUSTRIAL ENGINEERING

Podyman H.S.

AIR CIRCULATION INSIDE A POLYMER PIPE DURING CALIBRATION.....1

Rubanka M.M., Dvorzhak V.M., Zaliubovskyi M.H., Nychehlod V.V., Dromenko V.B.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE MOMENT OF INERTIA OF THE ROTATING
MASSES ON THE ROTOR SHAFT OF A ROTARY CRUSHER FOR THE PROCESSING
OF POLYMER WASTE.....8

Rudasov V.B., Holovina O.V., Yakubovskyi O.M.

STRESS-STRAIN STATE DURING THE STAMPING OF THIN-GAUGE STEELS
FOR AUTOMOTIVE COMPONENTS AND ITS RELATIONSHIP TO MATERIAL PROPERTIES.....15

AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

Stratonov V.M.

PROBLEMS OF INTER-SUBJECT INTERACTION IN THE "PILOT – AIR TRAFFIC
CONTROLLER - RESCUER" SYSTEM DURING AIRCRAFT FIRES..... 26

Younis B.N.

FINITE ELEMENT MODELLING OF LAYERED COMPOSITE PANELS FOR AEROSPACE
STRUCTURES: MESH SENSITIVITY, BOUNDARY CONDITIONS, AND BUCKLING
BEHAVIOUR UNDER COMBINED LOADING..... 33

SHIPBUILDING

Kazariezov A.Ya.

THE APPLICATION FEATURES OF THE SYSTEM APPROACH IN AN AUTONOMOUS
UNDERWATER EQUIPMENTWITH A TOWED RADIOBUOY DESIGN.....40

Kazymyrenko Yu.O., Hrudinina H.S.

METHODOLOGY FOR DESIGNING HOUSING STRUCTURES FOR UNDERWATER VEHICLES..45

ELECTRICAL ENGINEERING

Maksysko O.R.

FUNDAMENTALS OF SMART ELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....50

Trotsenko Ye.O., Nesterko A.B., Protsenko O.R., Peretyatko Yu.V.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CORONA DISCHARGES ON THE RELIABILITY
OF SURFACE DISCHARGE MEASUREMENTS IN HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL
INSTALLATIONS.....59

EQUIPMENT

Haidai H.Yu., Hrieshnov A.Yu.

AUTOMATED MOBILE DEVICE FOR CHECKING
THE GEOMETRY ACCURACY OF CALIBRATION PLATES.....67

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Hurzhiy S.V.

ASPECTS OF DECENTRALIZING THE COMMUNICATION SYSTEM FOR COORDINATING
UAVS/UGVS IN THE PRESENCE OF RADIO FREQUENCY INTERFERENCE.....73

Katin P.Yu, Yatsenko D.V., Mishyn O.V.

EXPERIMENTAL STUDY OF TRANSMISSION AND PROCESSING LATENCY OF GNSS DATA
IN DIFFERENT DATA REPRESENTATION FORMATS FOR IOT SYSTEMS.....80

Movchan K.O.

CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ADAPTIVE COMMUNICATION
PROTOCOLS FOR TACTICAL UAV AND UGV NETWORKS.....88

Morshchavka S.V., Bugrova T.I., Chornoborodov M.P., Logacheva L.M., Samoylyk S.S. RADIO NETWORK COVERAGE PREDICTION METHODS USING DEEP LEARNING AND DECOMPOSITION APPROACH BASED ON CELLULAR AUTOMATA.....	96
Sereda S.S., Kravchenko P.O. METHODS OF WIRELESS DATA TRANSMISSION BETWEEN UNMANNED AERIAL VEHICLES IN A SWARM.....	103
Skolets S.S., Kravchuk S.O. COMPREHENSIVE E2E QOS ASSESSMENT METHOD VIA INTEGRATED RAN AND SDN-TRANSPORT MODELING IN 5G NETWORKS.....	110
Sudakov Ye.V., Sokol H.V. METHOD FOR ESTIMATING AVERAGE PACKET DELAY IN NETWORKS WITH MIMO TECHNOLOGY AND RANDOM ACCESS.....	118

POWER ENGINEERING

Alfimov Ye.B. OPERATIONAL MANEUVERING OF SMALL MODULAR REACTOR IN DAILY BALANCING UNDER HIGH SOLAR AND WIND GENERATION.....	124
Bednarska I.S. Lishchuk S.R. ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF THERMAL INSULATION OF CHP POWER UNIT EQUIPMENT IN THE POST-REPAIR PERIOD.....	132
Eyyubova K. COMPARATIVE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF DIFFERENT TYPES OF HEAT EXCHANGERS.....	137
Klymenko V.M., Avdieieva O.P., Usatiy O.P. MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF GAS TURBINE BLADE MATERIALS BASED ON LIFE CYCLE ASSESSMENT: INTEGRATING ECONOMIC, ENVIRONMENTAL, AND PERFORMANCE METRICS.....	144
Lavrishchev O.O., Novosyletsky Yu.L., Logvinov G.S. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF DIFFERENT TYPES OF HEAT PUMPS UNDER VARIABLE OUTDOOR TEMPERATURE CONDITIONS.....	151
Rachynskyi A.Yu., Baranyuk O.V., Onysko A.I., Pikenin O.O. MODELING OF FIRE PROCESSES IN THE DKVR-10-13 BOILER WHEN COMBUSTING BIOGENIC FUEL AT VARIABLE OPERATING MODES.....	156
Tortika D.M. HEAT TREATMENT OF DIELECTRIC MATERIALS IN THE MANUFACTURE OF FUNCTIONAL GRADIENT MATERIALS USING MICROWAVE HEATING.....	165

METALLURGY

Barmin O.Ye. EFFECT OF TUNGSTEN ON THE GRAIN STRUCTURE AND PROPERTIES OF IRON-BASED ALLOYS.....	171

CHEMICAL TECHNOLOGY

Yefimenko O.V. DETERMINATION OF THE COMPONENT COMPOSITION AND PHYSICO-CHEMICAL INDICATORS OF BIOMETHANE BY CHROMATOGRAPHIC METHOD.....	177
Koval M.G., Yashchuk L.B. A STUDY OF COST SAVINGS FROM DIRECT DYES IN THE RECYCLING OF CONCENTRATED WASTEWATER DURING THE DYEING OF COTTON FABRICS.....	187
Nesterenko M.B. INFLUENCE OF THE CHARACTERISTICS OF MINERAL FILLERS (LIMESTONE AND SAND) ON THE FORMATION OF THE PORE STRUCTURE AND FROST RESISTANCE OF DRY BUILDING MIXTURES.....	197

Rumiantseva M.O., Mysov O.P., Savchenko M.A. COMPUTER MODELING OF THE SILICA PRECIPITATION PROCESS BY THE SULFURIC ACID METHOD (PART II).....	203
Smirnov D.O., Ushakov D.R. THEORETICAL ASPECTS OF FORMATION OF CEMENT SYSTEMS BASED ON BARIUM ALUMINATES AND ZIRCONATES	210
Frolova L.A., Saltykov D.Yu., Mandryka A.H, Frolov O.O. INFLUENCE OF SYNTHESIS PARAMETERS ON THE MICROWAVE CHARACTERISTICS OF COBALT FERRITE.....	218

TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

Kramarenko D.P., Hirenko N.I. DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF EVAPORATION OF A LIQUID FOOD MEDIUM UNDER NON-STATIONARY CONDITIONS.....	227

TRANSPORT

Vilshaniuk M.S. LOGISTICAL ASPECTS OF GRAIN EXPORTS: CHOOSING AN EFFICIENT DELIVERY METHOD...	234
Gildeev D.O., Onyshchenko S.P. CONCEPT OF THE CARGO DELIVERY SYSTEMS FORMATION AND OPTIMIZATION TAKING INTO ACCOUNT EMISSIONS.....	239
Yesyev A.I. MODERNIZATION OF LIFEBOATS USING SOLAR PANELS.....	245
Zhuk M.M., Pivtorak H.M., Skyba M.B. SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF DEMAND FOR SHOPPING TRIPS (CASE STUDY OF LVIV).....	252
Kyrylova V.Yu., Kyrylova O.V. TRIADIC CONCEPTUAL MODEL OF PORT SYSTEM DEVELOPMENT: SMART PORT, PUBLIC–PRIVATE PARTNERSHIP, PEOPLE–PLANET–PROFIT.....	258
Kovalenko N.O. PROBLEMS AND PROSPECTS OF DIGITAL TRANSFORMATION IN AVIATION MANAGEMENT: AN ENGINEERING-ECONOMIC AND ENGINEERING APPROACH.....	269
Kolodnenko V.M., Tatsenko O.V., Voloshko T.P., Rudenko V.A., Reshetilo S.O. LOGISTICS RISKS OF INTERNATIONAL ROAD TRANSPORTATION AND WAYS OF THEIR MINIMIZATION.....	275
Reshetkov D.M., Pavlova N.L. PROBLEMS OF OVERLOADING OF SEAPORTS.....	280
Sokolova O.Ye., Borets I.V. MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF CARGO HANDLING PROCESSES IN AN AIRPORT NODE OF AN INTEGRATED TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM.....	288
Tomchakovsky G.G., Kucherenko N.V., Kapochkina M.B. THE SUMMER MONSOON VARIABILITY IN THE ARABIAN SEA.....	297
Fomenko H.R. THE DEVELOPMENT OF SMART CITIES – A PATH TO A BETTER LIFE.....	307

ELECTRONICS

Makarenko V.V. EFFICIENCY ANALYSIS OF THE USE OF COUPLED INDUCTIVE COILS IN DC/DC POWER CONVERTERS.....	313
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	319

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 678.027:532.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/01>**Подиман Г.С.**<https://orcid.org/0000-0002-4102-5656>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЦИРКУЛЯЦІЯ ПОВІТРЯ ВСЕРЕДИНИ ПОЛІМЕРНОЇ ТРУБИ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ

У роботі розглянуто процес циркуляції повітря всередині полімерної труби під час її проходження через вакуумно-калібрувальний пристрій екструзійної лінії, коли внутрішня поверхня труби здійснює поступальний рух відносно повітря в її об'ємі. На основі рівнянь нерозривності та руху сформульовано аналітичну модель усталеної ламінарної течії повітря, зумовленої поєднанням зсувного руху стінки труби та малої різниці тиску між вхідним і вихідним перерізами. Модель враховує суперпозицію двох зустрічних осесиметричних потоків, що дозволяє описати циркуляцію повітря та вплив градієнта тиску вздовж осі труби.

На основі розв'язання відповідних рівнянь визначено розподіли осьової швидкості повітря по радіусу, характерні значення швидкості в центральній і пристінковій зонах, а також залежності цих параметрів від числа Рейнольдса та геометричних характеристик системи. Обчислено об'ємні та масові витрати повітря у протилежно спрямованих потоках, що дозволило оцінити інтенсивність циркуляції при зміні швидкості витягування труби та розмірів калібрувальної ділянки. Показано, що для типових умов екструзії перепад тиску вздовж труби становить кілька паскалів, що свідчить про незначний вплив внутрішньої циркуляції на гідродинамічні втрати.

Оцінено вплив внутрішнього газового потоку на теплообмін між полімерною заготовкою та повітрям. Порівняння характерних швидкостей і коефіцієнтів тепловіддачі показує, що інтенсивність охолодження внутрішньої поверхні труби практично не змінюється, тоді як основний теплообмін визначається зовнішнім охолодженням. Отримані результати можуть бути використані для інженерної оцінки процесів калібрування та оптимізації режимів екструзії без застосування складного чисельного моделювання.

Ключові слова: екструзія полімерних труб, калібрування, циркуляція повітря, ламінарна течія, зсувна течія, перепад тиску, теплообмін.

Постановка проблеми. Процес калібрування полімерних труб є однією з ключових стадій екструзії при виробництві полімерних труб. Він безпосередньо визначає точність геометричних параметрів виробу, стабільність товщини стінки та якість поверхні готової продукції. У промислових умовах калібрування здійснюється за рахунок зовнішнього охолодження та вакуумування, тоді як внутрішній об'єм труби, як правило, заповнений повітрям і вважається таким, що не впливає істотно на перебіг процесу.

Під час руху трубної заготовки через калібратор внутрішня поверхня труби взаємодіє з газовим середовищем (повітрям), створюючи зсувні напруження, які можуть ініціювати осьову течію

повітря. Додатковим чинником є можливий перепад тиску між вхідною зоною, обмеженою дорном екструзійної головки, та вихідним перерізом труби, сполученим з навколишнім середовищем. Сукупна дія цих факторів здатна призводити до формування замкненої циркуляції повітря у внутрішньому об'ємі труби.

Наявність внутрішньої циркуляції повітря зумовлює виникнення зсувної течії вздовж внутрішньої поверхні трубної заготовки, що змінює локальні умови конвективного теплообміну між полімером і газовим середовищем. За певних геометричних і режимних параметрів це може призводити до відхилень у швидкості охолодження та релаксації напружень, що вимагає кількісної

оцінки впливу внутрішнього повітряного потоку на процес калібрування. У зв'язку з цим постає науково-практична проблема кількісної оцінки інтенсивності внутрішньої циркуляції повітря та визначення доцільності її врахування при розрахунках параметрів процесу калібрування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процеси екструзії та калібрування полімерних труб широко висвітлені у фундаментальних працях з технології переробки полімерів, де основну увагу приділено реологічним властивостям розплаву, механіці течії в формувальному інструменті та теплообміну на зовнішній поверхні виробу [1, с. 235-300; 2, с. 120-180; 3, с. 200-260; 5, с. 180-240]. У зазначених роботах внутрішній газовий об'єм труби зазвичай розглядається як пасивне середовище, що не чинить помітного впливу на теплові та гідродинамічні процеси.

У сучасних дослідженнях з моделювання процесів екструзії значна увага приділяється числовим методам аналізу течії полімерного розплаву та теплообміну, зокрема із застосуванням CFD-підходів [6]. Проте такі моделі орієнтовані переважно на опис поведінки в'язкопластичних матеріалів і не охоплюють детально газодинамічні процеси у внутрішніх порожнинах виробів.

Дослідження з механіки рідин і газів із рухомими межами описують ламінарні зсувні течії в каналах та трубах за наявності градієнта тиску [3, с. 200-260; 4, с. 100-160]. Водночас результати цих робіт мають узагальнений характер і не адаптовані безпосередньо до специфічних умов калібрування полімерних труб, де поєднуються малі швидкості, низькі перепади тиску та змінна температура поверхні.

Окремі сучасні публікації присвячені аналізу багатопарової коекструзії труб та особливостей формування їхньої структури [7, с. 64-72], однак внутрішня аеродинаміка виробу в них не розглядається.

Дослідження безпосередньо розвиває результати попередньої роботи [8, с. 75-77], присвяченої циркуляції повітря всередині труби під час калібрування, де показано що падіння тиску незначне і становить лише кілька Паскаль. У даній статті цей підхід узагальнено: уточнено постановку задачі, отримано повний аналітичний розв'язок для поля швидкостей, витрат повітря та перепаду тиску, а також проведено оцінку впливу внутрішнього потоку на теплові умови охолодження заготовки.

Таким чином, невирішеною частиною наукової проблеми залишалася побудова аналітичної моделі циркуляції повітря у внутрішньому об'ємі полімерної труби під час калібрування та кількісна оцінка впливу цієї циркуляції на технологічні параметри процесу.

Постановка завдання. Мета даного дослідження полягає у отриманні аналітичних залежностей для опису стаціонарної ламінарної циркуляції повітря у внутрішньому об'ємі полімерної труби під час калібрування, визначенні швидкісних профілів, витрат повітря та перепаду тиску, а також у кількісній оцінці впливу цих процесів на технологічні умови охолодження трубної заготовки.

Наукова новизна роботи полягає у вперше виконаному аналітичному описі циркуляційної течії повітря у внутрішньому об'ємі рухомої полімерної труби під час калібрування з урахуванням спільної дії зсувних напружень з боку внутрішньої поверхні труби за малих градієнтів тиску. Отримані результати дозволяють без застосування числового моделювання оцінити інтенсивність внутрішньої циркуляції та обґрунтувати умови, за яких вона потребує врахування при визначенні режимів калібрування.

Виклад основного матеріалу. Постановка задачі. Розглядається полімерна труба циліндричної форми, яка зі сталою швидкістю переміщується вздовж осі калібруатора. Внутрішній об'єм труби збоку екструзійної головки обмежений торцевою поверхнею дорна, тоді як на виході труба сполучена з навколишнім середовищем. За таких умов тиск повітря на вихідному перерізі дорівнює атмосферному, тоді як у зоні контакту з дорном він може відрізнитися від нього.

Унаслідок руху труби шар повітря, що безпосередньо прилягає до її внутрішньої поверхні, втягується у рух за рахунок в'язкого зчеплення зі стінкою та переміщується у напрямку виходу з калібруатора. Для забезпечення балансу маси в центральній частині труби формується зустрічний потік холоднішого повітря, спрямований у бік дорна. Таким чином, у внутрішньому об'ємі труби виникає замкнена циркуляційна течія. Розрахункова схема циркуляції повітря у внутрішньому об'ємі труби, що рухається зі сталою швидкістю під час калібрування, наведена на рис. 1.

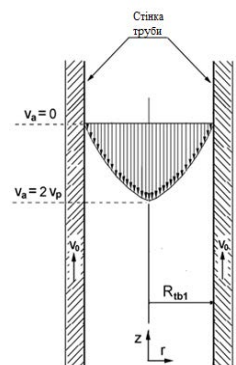


Рис. 1. Розрахункова схема циркуляції повітря відносно рухомої полімерної труби

Конструктивні обмеження та їх опис. Розглядається типова конструкція вакуумно-калібрувального пристрою для екструзії полімерних труб із внутрішнім діаметром порядку десятків міліметрів, де довжина калібрувальної ділянки порядку десятків діаметрів труби. Припускається, що геометричні параметри калібратора залишаються сталими вздовж осі, а довжина зони циркуляції достатньо велика, порівняно з діаметром, щоб знехтувати входними ефектами та вважати течію квазірозвиненою.

Математична модель. Аналіз циркуляції повітря проводиться в циліндричній системі координат, вісь якої співпадає з віссю труби. Рух повітря вважається стаціонарним, ламінарним і вісесиметричним. Повітря розглядається як ньютонівське в'язке середовище з нехтівною стисливістю; густина та динамічна в'язкість вважаються сталими в межах досліджуваного інтервалу температур і тисків.

Унаслідок руху труби зі швидкістю v_{mp} у пристінковій зоні формується зсувна течія, спрямована до вихідного перерізу. Для забезпечення балансу маси в центральній частині труби виникає зустрічний потік повітря, зумовлений різницею тисків Δp між вхідним і вихідним перерізами.

Оскільки рух відбувається лише вздовж осі труби, рівняння балансу сил для осьової складової швидкості $v_z(r)$ має вигляд, що відповідає осьовій компоненті рівняння Нав'є-Стокса для стаціонарної осесиметричної течії в циліндричних координатах:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr}(r \cdot \tau_{rz}) = \frac{dp}{dz}; \quad (1)$$

де τ_{rz} – дотичне напруження зсуву.

З урахуванням ньютонівського закону в'язкості

$$\tau_{rz} = \mu \cdot \frac{dv_z}{dr}; \quad (2)$$

одержуємо диференціальне рівняння

$$\left(\frac{dv_z}{dr}\right) = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz}; \quad (3)$$

Інтегрування цього рівняння з урахуванням прийнятих граничних умов дає загальний вигляд розподілу осьової швидкості. При цьому використовуються такі граничні умови:

– на осі труби виконується умова обмеженості швидкості:

$$\left.\frac{dv_z}{dr}\right|_{r=0} = 0; \quad (4)$$

– на внутрішній поверхні труби задається умова прилипання:

$$v(R) = v_r; \quad (5)$$

– на границі центрального і пристінкового потоків забезпечується неперервність швидкості та зсувних напружень.

Інтегрування отриманого диференціального рівняння з урахуванням наведених граничних умов дає аналітичний вираз для розподілу осьової швидкості повітря по радіусу труби. У загальному вигляді профіль швидкості може бути поданий як суперпозиція зсувної та напірної складових:

$$\vartheta_z(r) = \vartheta_{mp} \left(1 - \frac{r}{R_T}\right) - \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} (R_T^2 - r^2); \quad (6)$$

де ϑ_{mp} – швидкість поступального руху труби, R_T – внутрішній радіус труби, μ – динамічна в'язкість повітря, $\frac{dp}{dz}$ – осьовий градієнт тиску.

Отриманий вираз описує розподіл швидкості повітря в радіальному напрямку та дозволяє визначити об'ємні і масові витрати повітря в центральній і пристінковій зонах течії.

Середня об'ємна витрата повітря в центральній частині потоку визначається за рівнянням Пуазейля, яке в даному випадку використовується як аналітична оцінка для ламінарної осьової течії в циліндричному каналі та дозволяє встановити порядок величини витрати і перепаду тиску:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L}; \quad (7)$$

де R – характерний радіус зони течії, L – довжина труби.

Аналогічні залежності справедливі й для пристінкового потоку з урахуванням руху обмежувальної поверхні.

Оцінка характеру режиму течії. Для підтвердження припущення про ламінарний режим течії виконано оцінку числа Рейнольдса, визначеного за характерною швидкістю повітря та внутрішнім діаметром труби. За умов, характерних для промислової екструзії полімерних труб середніх діаметрів, швидкість витягування трубної заготовки становить 0,1–0,5 м/с, внутрішній радіус труби – 10–50 мм, а довжина калібрувальної ділянки – 0,3–1,0 м [1–3].

Число Рейнольдса не перевищує значень $Re \approx 10^2$, що значно нижче критичних значень для переходу до турбулентного режиму.

Таким чином, прийнята модель ламінарної течії фізично обґрунтована. Це дозволяє використовувати аналітичний підхід без залучення складних числових методів.

Отримана аналітична модель використовується для послідовного розрахунку поля осьової

вих швидкостей повітря, об'ємних і масових витрат у зустрічно спрямованих потоках, а також перепаду тиску вздовж калібрувальної ділянки. Подальша оцінка числа Рейнольдса та питомих теплових потоків дозволяє встановити режим течії та кількісно визначити внесок внутрішньої циркуляції у загальний тепловий баланс процесу калібрування.

Межі застосовності моделі. Побудована аналітична модель внутрішньої циркуляції повітря базується на низці фізичних припущень, які визначають межі її коректного застосування. Насамперед модель справедлива для ламінарного режиму течії, що реалізується за малих значень числа Рейнольдса, характерних для процесів калібрування полімерних труб при промислових швидкостях витягування.

Зі збільшенням швидкості руху труби або внутрішнього діаметра можливе зростання числа Рейнольдса до значень, за яких ламінарний режим може порушуватися. У таких випадках для адекватного опису течії необхідно враховувати турбулентні ефекти.

Також у моделі знехтувано стисливість повітря, що допустимо за умови малих швидкостей газового потоку та незначних перепадів тиску. За наявності значних осьових градієнтів тиску або за високих швидкостей руху труби може виникати потреба в урахуванні змін густини газу.

Запропонована аналітична модель описує динаміку газового середовища у внутрішньому об'ємі труби, а тому є не залежною від конкретного типу термопласту. Разом з тим вона орієнтована на типові температурні та швидкісні режими екструзії труб з поліетилену, поліпропілену та інших поширених термопластів, за яких реалізується ламінарний режим течії повітря, малі перепади тиску та відсутні значні осьові варіації геометрії калібрувальної ділянки.

Слід підкреслити, що запропонована модель не призначена для прямого заміщення детальних числових розрахунків або експериментальних досліджень у всьому діапазоні можливих режимів. Її основне призначення полягає у встановленні кількісних критеріїв, за яких вплив внутрішньої циркуляції повітря на гідродинамічні та теплові умови калібрування можна вважати несуттєвим, а також у визначенні граничних режимів, за яких це припущення може бути порушене і потребує більш детального аналізу.

Виклад основного матеріалу. Отримані аналітичні залежності для розподілу осьової швидкості повітря в радіальному напрямку дозволяють

детально охарактеризувати структуру внутрішньої циркуляційної течії. У пристінковій зоні формується потік, спрямований у бік виходу з калібратора, інтенсивність якого визначається швидкістю поступального руху труби. У центральній частині внутрішнього об'єму при цьому виникає зустрічний потік, зумовлений забезпеченням балансу маси.

На основі інтегрування функцій, які описують профілі швидкостей, визначено об'ємні та масові витрати повітря для обох потоків. З умови рівності масових витрат встановлено положення межі між центральною та пристінковою зонами течії. Показано, що зі збільшенням швидкості руху труби межа потоків зміщується в осьовому напрямку, що свідчить про зростання ролі зсувної течії у формуванні загальної циркуляції.

Границю між центральним та пристінковим потоками визначено з умови балансу масових витрат у протилежних напрямках. Сумарна масова витрата повітря, що переноситься пристінковим потоком у напрямку вихідного перерізу труби, дорівнює масовій витраті центрального потоку, спрямованого у бік дорна, що забезпечує відсутність накопичення повітря в будь-якій ділянці внутрішнього об'єму труби.

$$m_{\text{центр}} + m_{\text{прист}} = 0, \quad (8)$$

де $m_{\text{центр}}$ — масова витрата центрального потоку, $m_{\text{прист}}$ — масова витрата пристінкового потоку.

Оцінка перепаду тиску вздовж труби показує, що його величина не перевищує одиниць Паскаль навіть за відносно високих швидкостей витягування. Це узгоджується з малими значеннями числа Рейнольдса та підтверджує ламінарний характер течії повітря. Збільшення довжини калібрувальної ділянки призводить до пропорційного зростання витрат тиску, однак і в цьому випадку їх абсолютні значення залишаються незначними.

Окрім газодинамічних характеристик, важливе питання можливого впливу внутрішньої циркуляції повітря на теплові умови охолодження трубної заготовки. Для цього доцільно виконати масштабну оцінку теплового потоку, що передається від внутрішньої поверхні труби до повітря.

За ламінарного режиму течії та малих швидкостей руху повітря коефіцієнт тепловіддачі з боку газового середовища має невеликі значення, характерні для природної або слабкої примусової конвекції. Відповідний питомий тепловий потік від внутрішньої поверхні труби до повітря на кілька порядків менший, порівняно з тепловіддачею до охолоджувального середовища з зовнішнього боку труби. Наприклад, для швидкостей

повітря порядку 0,01–0,1 м/с коефіцієнт тепловіддачі становить приблизно 5–10 Вт/(м²·К)

Таким чином, навіть за наявності циркуляційної течії повітря її внесок у загальний тепловий баланс процесу калібрування незначний. Основний вплив на інтенсивність охолодження трубної заготовки визначається умовами зовнішнього теплообміну, тоді як внутрішнє газове середовище відіграє другорядну роль.

Отриманий результат узгоджується з практичними спостереженнями стабільності процесу калібрування та підтверджує можливість ігнорування внутрішньої циркуляції повітря при інженерних теплових розрахунках.

Для ілюстрації впливу основних технологічних параметрів у табл. 1 наведено розрахункові оціночні значення швидкостей руху труби, числа Рейнольдса, перепаду тиску та об'ємної витрати повітря.

Таблиця 1

Оціночні параметри внутрішньої циркуляції повітря

Швидкість труби, м/с	Діаметр труби, мм	Re	Δp , Па	Q, м ³ /с
0,05	50	35	0,3	$5 \cdot 10^{-4}$
0,10	50	70	0,6	$9 \cdot 10^{-4}$
0,15	50	105	0,9	$1,3 \cdot 10^{-3}$

Як видно з наведених у табл. 1 даних, зі збільшенням швидкості руху труби число Рейнольдса зростає пропорційно, однак залишається на рівні, який істотно нижчий за критичні значення для переходу до турбулентного режиму.

Перепад тиску вздовж труби також зростає зі збільшенням швидкості, проте навіть за максимальних розглянутих режимів його величина не перевищує одиниць Паскаль. Відповідні об'ємні витрати повітря залишаються малими порівняно з витратами охолоджувальної води, що забезпечує відсутність помітного впливу внутрішньої циркуляції на гідравлічні характеристики калібрувальної системи загалом.

Порівняльний аналіз отриманих результатів із характерними тепловими потоками під час охолодження трубної заготовки, наведеними у [4], дозволяє зробити висновок, що внутрішня циркуляція повітря практично не впливає на інтенсивність тепловідведення. Таким чином, у більшості інженерних розрахунків процесу калібрування вплив внутрішнього газового середовища може бути знехтуваний без істотної втрати точності.

Для наочного порівняння інтенсивності теплообміну в табл. 2 наведено орієнтовні значення

питомих теплових потоків для внутрішньої та зовнішньої поверхонь трубної заготовки під час калібрування.

Оцінки питомих теплових потоків від внутрішньої поверхні труби до повітря та до зовнішнього охолоджувального середовища наведено для характерних температурних. При цьому передбачається ламінарний режим руху повітря, малі осьові градієнти тиску та типові різниці температур між розплавом і охолоджувальною водою, що відповідають рекомендованим технологічним режимам для термопластичних матеріалів. За таких умов питомий тепловий потік до повітря виявляється на два–три порядки меншим порівняно з тепловіддачею до води, що й обґрунтовує другорядну роль внутрішньої циркуляції у загальному тепловому балансі процесу калібрування.

Для кількісної оцінки виконано масштабну оцінку питомих теплових потоків від внутрішньої поверхні труби до повітря та до зовнішнього водяного середовища.

Таблиця 2

Порівняння питомих теплових потоків під час калібрування труби

Джерело теплообміну	Орієнтовний питомий тепловий потік, Вт/м ²
Повітря всередині труби	10^1
Охолоджувальна вода в калібраторі	10^3 – 10^4

Наведені дані свідчать, що тепловий потік від внутрішньої поверхні труби до повітря на два–три порядки менший, ніж тепловіддача до охолоджувальної води з зовнішнього боку. Це підтверджує зроблений висновок про незначний вплив внутрішньої циркуляції повітря на загальну інтенсивність охолодження трубної заготовки.

Таким чином, запропонована аналітична модель може бути використана на етапі інженерного аналізу для швидкої оцінки доцільності врахування внутрішньої циркуляції повітря в розрахунках процесу калібрування. У випадках, коли розрахункові значення числа Рейнольдса та питомих теплових потоків відповідають наведеним у роботі оцінкам, вплив внутрішнього газового потоку може бути обґрунтовано знехтуваний. За виходу параметрів за ці межі модель слугує базою для постановки розширених числових або експериментальних досліджень.

Практичні рекомендації. Отримані результати дозволяють сформулювати прості критерії практичного застосування аналітичної моделі. Встановлення умов, за яких внутрішня циркуля-

ція повітря не чинить суттєвого впливу на тепловий стан трубної заготовки, є необхідним етапом обґрунтування застосовності спрощених інженерних моделей. Отримані оцінки числа Рейнольдса та перепаду тиску не зменшують актуальності дослідження, а, навпаки, дозволяють кількісно окреслити межі режимів, у яких вплив газового середовища може бути обґрунтовано знехтуваний. У такому разі при інженерних розрахунках процесу охолодження доцільно зосередитися на зовнішньому водяному теплообміні, використовуючи внутрішню циркуляцію лише для перевірки коректності прийнятих спрощень. Для попередніх оцінок рекомендується орієнтуватися на наведені в роботі таблиці, які задають типові рівні швидкостей, чисел Рейнольдса, перепадів тиску та об'ємних витрат повітря для реальних промислових режимів екструзії полімерних труб.

Висновки

1. У процесі калібрування полімерних труб у їхньому внутрішньому об'ємі формується стаціонарна ламінарна циркуляційна течія повітря, зумовлена рухом труби та наявністю малого перепаду тиску між вхідним і вихідним перерізами.

2. Аналітичні розрахунки показали, що за характерних геометричних і режимних параметрів вакуумного калібрування полімерних труб перепад тиску повітря вздовж внутрішнього об'єму становить лише кілька Паскаль, а об'єми циркулюючого повітря порівняно малі.

3. Розрахунковий перепад тиску вздовж труби не перевищує одиниць Паскаль, що свідчить про низьку інтенсивність газодинамічних процесів у внутрішньому об'ємі виробу.

4. Встановлено, що за наведених умов внесок внутрішньої конвекції повітря у загальний процес відведення теплоти від полімерної заготовки незначний, тому інтенсивність охолодження визначається переважно зовнішнім водяним охолодженням і параметрами контакту труби з калібратором.

5. Отримані аналітичні вирази для розподілу швидкостей, витрат і перепаду тиску можуть бути використані як спрощений інженерний інструмент для попереднього проектування калібрувальних ділянок без залучення повномасштабного комп'ютерного моделювання.

Перспективи подальших досліджень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі з урахуванням теплопереносу між внутрішньою поверхнею труби та газовим середовищем, а також нестационарних режимів роботи екструзійної лінії. Окремий інтерес становить числова валідація отриманих аналітичних залежностей із використанням комп'ютерного моделювання та їх експериментальна перевірка на промисловому обладнанні, зокрема для труб великого діаметра та підвищених швидкостей калібрування.

Перспективний напрям полягає у розширенні моделі на випадки нестационарних режимів витягування труби, коли швидкість руху може мати пульсації або повільні коливання в часі. Це дозволить оцінити вплив динамічних змін режиму на структуру внутрішньої циркуляції та на стійкість процесу калібрування. Окремий інтерес становить адаптація підходу до коекструзії багатошарових труб, у яких внутрішній діаметр та теплові умови можуть істотно відрізнятися від одношарових систем, а також аналіз впливу змінної товщини стінки уздовж довжини виробу.

Список літератури:

1. Tadmor Z., Gogos C.G. *Principles of Polymer Processing*. Wiley, 2006. 984 p.
2. White J.L. *Polymer Extrusion*. Hanser, 1990. 456 p.
3. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. *Transport Phenomena*. Wiley, 2002. 905p.
4. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 2011. 1072 p.
5. Osswald T.A., Hernández-Ortiz J.P. *Polymer Processing*. Hanser, 2006. 338 p.
6. Hyvärinen M., Jabeen R., Kärki T. The modelling of extrusion processes for polymers: A review. *Polymers*. 2020. Vol. 12, No. 6. Article 1306. <https://doi.org/10.3390/polym12061306>
7. Hurin R., Gondliakh A., Sokolskyi O. Research of double-layer polymer pipes coextrusion process. *Mech. Adv. Technol.* 2025. Vol. 9, No. 1(104). Pp. 64–72. [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1\(104\).313378](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1(104).313378)
8. Подиман Г.С. Циркуляція повітря всередині труби під час калібрування. *Збірник тез доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання»* (24–26 травня 2022 р., м. Київ). К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 75–77.

Podyman H.S. AIR CIRCULATION INSIDE A POLYMER PIPE DURING CALIBRATION

The paper considers the process of air circulation inside a polymer pipe during its passage through a vacuum calibration unit of an extrusion line, where the inner surface of the pipe moves translationally relative

to the air within its volume. Based on the continuity and momentum equations, an analytical model of steady laminar airflow is formulated, caused by the combined effect of wall shear due to pipe motion and a small pressure difference between the inlet and outlet sections. The model accounts for the superposition of two oppositely directed axisymmetric flows, allowing the description of air circulation and the influence of the axial pressure gradient.

Based on the solution of the governing equations, the radial distribution of axial air velocity, characteristic velocity values in the core and near-wall regions, and their dependence on the Reynolds number and geometric parameters are determined. The volumetric and mass flow rates of air in the oppositely directed streams are calculated, enabling the evaluation of circulation intensity under varying pipe drawing speeds and calibration zone dimensions. It is shown that under typical extrusion conditions, the pressure drop along the pipe is only a few pascals, indicating a negligible effect of internal circulation on hydraulic losses.

The influence of internal airflow on heat transfer between the polymer melt and the air is also evaluated. A comparison of characteristic velocities and heat transfer coefficients shows that the cooling intensity of the inner pipe surface remains practically unchanged, while the main heat removal is governed by external cooling. The obtained results can be used for engineering assessment of calibration processes and optimization of extrusion regimes without the need for detailed numerical simulations.

Keywords: polymer pipe extrusion, calibration, air circulation, laminar flow, shear-driven flow, pressure drop, heat transfer.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 66.095.261/.262:658.567:62-8:[001.8:62-25
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/02>

Рубанка М.М.

<https://orcid.org/0000-0003-2367-0333>

Київський національний університет технологій та дизайну

Дворжак В.М.

<https://orcid.org/0000-0002-1693-9106>

Київський національний університет технологій та дизайну

Залюбовський М.Г.

<https://orcid.org/0000-0002-9183-2771>

Київський національний університет технологій та дизайну

Ничеглод В.В.

<https://orcid.org/0009-0007-3515-0948>

Київський національний університет технологій та дизайну

Дроменко В.Б.

<https://orcid.org/0000-0002-6360-0076>

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ОБЕРТОВИХ МАС НА ВАЛУ РОТОРА РОТОРНОЇ ДРОБАРКИ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті представлено результати експериментальних досліджень з визначення моменту інерції обертових мас привода роторної ножової дробарки, що використовується для переробки відходів полімерних матеріалів. Обґрунтовано необхідність точного знання інерційних параметрів для розроблення адекватних математичних моделей динаміки привода та раціонального підбору конструктивних параметрів маховика, що дозволяє мінімізувати вплив значних динамічних навантажень у період несталих режимів роботи роторної дробарки.

Особливу увагу в роботі приділено методу визначення осьового моменту інерції складних конструктивних елементів роторної дробарки, зокрема масивного маховика. Авторами реалізовано комплексний підхід, що поєднує: експериментальний метод вільного вибігу (самогальмування), який дозволяє визначити сумарний момент інерції системи без складного демонтажу обладнання, базуючись на показниках споживаної потужності холостого ходу та часу повного зупинення ротора, та аналітичний метод визначення осьового моменту інерції завдяки декомпозиції складної геометрії маховика на елементарні геометричні тіла (усічені конуси, циліндри, циліндричні сегменти, прямокутні паралелепіпеди тощо). Наведено детальні розрахункові вирази для кожного з цих елементів, що дозволило отримати точне значення осьового моменту інерції маховика ($J_M = 0,291 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$) та відокремити його від загального моменту інерції обертових мас на валу ротора.

Отримані результати підтверджують можливість варіювання інерційними характеристиками привода роторної ножової дробарки через зміну геометричних параметрів окремих елементів для підвищення енергоефективності процесу подрібнення.

Ключові слова: роторна ножова дробарка, момент інерції, метод вільного вибігу, маховик, геометричні параметри, переробка відходів полімерних матеріалів, динаміка привода, енергоефективність.

Постановка проблеми. Збільшення потужностей промислового виробництва полімерів супроводжується стрімким зростанням об'ємів утворюваних відходів. Проблема екологічного забруднення навколишнього середовища відходами полімерних матеріалів з кожним роком стає все більш гострішою [1, 2]. Тому слід більше приділяти уваги сучасним високоефективним технологічним процесам переробки полімерних відходів, розробки нового та вдосконалення існуючого обладнання для їх реалізації.

При проектуванні технологічного обладнання для вторинної переробки відходів полімерних матеріалів, зокрема роторних ножових дробарок, слід зосередитися на виборі раціональних параметрів привода в залежності від фізико-механічних властивостей та геометричних розмірів подрібнюваних відходів.

При розробці математичної моделі динаміки привода роторної ножової дробарки для переробки відходів полімерних матеріалів [3], що дозволить аналітично здійснювати раціональний підбір параметрів досліджуваного привода в залежності від заздалегідь відомих фізико-механічних властивостей та геометричних розмірів шматків подрібнюваних відходів, необхідно обов'язково знати моменти інерції обертових мас на валах електродвигуна та ротора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день найбільш поширеним та раціональним способом вторинної переробки відходів полімерних матеріалів є механічне подрібнення різанням [4-6]. До технологічного обладнання першочергово можна віднести роторні ножові дробарки [7, 8].

Практика використання роторних ножових дробарок показала, що в технологічному процесі подрібнення у крихту відходів полімерних матеріалів слід також враховувати значні динамічні навантаження, що виникають в період несталих режимів роботи та негативно позначаються на ефективності та довговічності роботи даного обладнання [9-12]. Розширення спектру подрібнюваних відходів полімерних матеріалів в роторних ножових дробарках стало можливим завдяки введенню до складу привода масивного маховика. Вдалось досягти певної універсальності використання даного обладнання з урахуванням фізико-механічних властивостей та основних геометричних параметрів шматків подрібнюваних відходів полімерних матеріалів [13].

Момент інерції обертових мас на валу електродвигуна (моменту інерції ротору електродвигуна) можна з легкістю знайти серед основних

технічних характеристик електродвигуна, що увійде до складу привода роторної дробарки. Щодо моменту інерції обертових мас на валу ротора, то тут ситуація дещо складніша, особливо, коли на валу ротора роторної ножової дробарки вже встановлено масивний маховик, а геометричні параметри та матеріал, з якого він виготовлений, невідомий. В даному випадку мова йде про інженерний розрахунок моменту інерції обертових мас на валу ротора ножової дробарки, що апіорі вже пов'язаний з певними труднощами. Щонайменше потрібно буде зробити вимушену зупинку технологічного обладнання з подальшим простоем, складний демонтаж окремих частин, визначення масо-інерційних параметрів масивного маховика тощо.

Перш ніж встановлювати на вал ротора роторної ножової дробарки масивний маховик, потрібно виконати достатньо точний інженерний розрахунок його конструктивних параметрів. Лише такий підхід дозволить підвищити ефективність та довговічність роботи даного обладнання.

Постановка завдання. Враховуючи актуальність питання вибору раціональних параметрів технологічного обладнання для переробки відходів полімерних матеріалів, завданням досліджень є експериментальне визначення моменту інерції обертових мас на валу ротора роторної дробарки. Об'єктом досліджень є технологічне обладнання для переробки відходів полімерних матеріалів. При вирішенні поставлених задач використано сучасні методи досліджень механічних систем, основні положення теорії електропривода та методи статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.

Виклад основного матеріалу. До відомих найбільш поширених методів експериментального визначення моменту інерції системи електродвигун – робоча машина можна віднести: метод крутильних коливань, метод допоміжного маятника, метод падаючого вантажу та метод вільного вибігу [14-16].

В даному випадку для експериментального визначення моменту інерції обертових мас на валу ротора роторної дробарки найбільш прийнятним є метод вільного вибігу (метод холостого ходу і самогальмування), що зазвичай використовують для приводів технологічного обладнання великої потужності, механічних систем, які мають складну кінематичну схему з декількома ланками механічних передач і вузлів, що здійснюють складний рух, а також у тих випадках, коли інженерний розрахунок моменту інерції супроводжується значними труднощами.

Заплановані дослідження проводились на спеціально розробленій і виготовленій експериментальній роторній ножовій дробарці [13], кінематичну схему якої представлено на рис. 1.

Процес експериментального визначення моменту інерції обертових мас на валу ротора роторної дробарки відбувався наступним чином. На першому етапі, привод роторної ножової дробарки розганявся на холостому ході до встановленої кутової швидкості обертання вала електродвигуна $\omega_{\text{де}0}$, при цьому фіксувались показники спожитої потужності $P_{\text{де}0}$.

На другому етапі, електродвигун вимикався з мережі і за допомогою аналого-цифрового перетворювача фіксувались показники залежності кутової швидкості від часу $\omega = f(t)$ при самогальмуванні привода до повної зупинки.

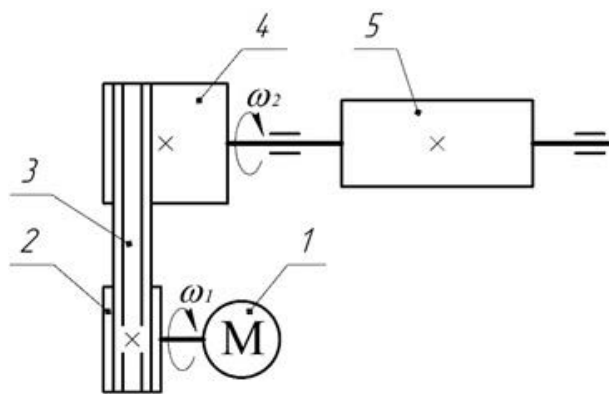


Рис. 1. Кінематична схема привода експериментальної роторної ножової дробарки: 1 – електродвигун; 2 – ведучий шків; 3 – клиновий пас; 4 – ведений шків-маховик; 5 – ротор

Аналітично момент інерції привода роторної дробарки (рис. 1) може бути визначений за формулою [17-19]:

$$J = J_1 + \frac{J_2}{u^2}, \quad (1)$$

де J_1 , J_2 – моменти інерції обертових мас на валу електродвигуна і на валу ротора відповідно;
 u – передаточне відношення клинопасової передачі привода роторної ножової дробарки,

$$u = \frac{d_2}{d_1(1-\xi)} = \frac{n_1}{n_2};$$

d_1 , d_2 – діаметри ведучого та веденого шківів клинопасової передачі;

ξ – коефіцієнт пружного ковзання паса, $\xi = 0,01 \dots 0,02$ [20-23];

n_1 – частота обертання вала електродвигуна; n_2 – частота обертання вала ротора.

Основні технічні характеристики електродвигуна загальнопромислового призначення АИР 100S4У2, що входить до складу привода роторної ножової дробарки, представлені в табл. 1.

З іншого боку, момент інерції привода роторної ножової дробарки може бути визначений експериментально методом вільного вибігу (методом холостого ходу і самогальмування) [14-16]:

$$J = \frac{2P_{\text{де}0} \cdot t_0}{\omega_{\text{де}0}^2}, \quad (2)$$

де $P_{\text{де}0}$ – потужність електродвигуна в режимі холостого ходу; t_0 – час вільного вибігу привода роторної ножової дробарки (з моменту вимкнення електродвигуна і до його повної зупинки); $\omega_{\text{де}0}$ – кутова швидкість, до якої розганяється електродвигун в режимі холостого ходу, $\omega_{\text{де}0} = \frac{\pi n_{\text{де}0}}{30}$; $n_{\text{де}0}$ – номінальна частота обертання вала електродвигуна в режимі холостого ходу.

Таблиця 1

Основні технічні характеристики електродвигуна АИР 100S4У2

Показники	Кількісна характеристика
Номінальна потужність, кВт	3,0
Номінальна частота обертання, об/хв	1395
Коефіцієнт корисної дії, %	80
Момент інерції ротору, кг·м²	0,01

$$P_{\text{де}0} = 180 \text{ Вт}; \quad n_1 = n_{\text{де}0} = 1395 \text{ об/хв}; \quad n_2 = 1200 \text{ об/хв};$$

$$\omega_{\text{де}0} = \frac{\pi n_{\text{де}0}}{30} = \frac{\pi \cdot 1395}{30} = 146,084 \text{ рад/с};$$

$$u = \frac{d_2}{d_1(1-\xi)} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1395}{1200} = 1,163.$$

З графіку залежності кутової швидкості вала ротора дробарки від часу при самогальмуванні привода до повної зупинки (рис. 2), визначаємо значення t_0 :

$$t_0 = 46,020 - 5,207 = 40,813 \text{ с.}$$

Із виразу (2) знаходимо момент інерції привода:

$$J = \frac{2P_{\text{де}0} \cdot t_0}{\omega_{\text{де}0}^2} = \frac{2 \cdot 180 \cdot 40,813}{146,084^2} = 0,688 \text{ кг·м}^2$$

Із виразу (1) знаходимо момент інерції обертових мас на валу ротора:

$$J_2 = (J - J_1) \cdot u^2 = (0,688 - 0,01) \cdot 1,163^2 = 0,917 \text{ кг·м}^2.$$

При необхідності величиною моменту інерції обертових мас на валу ротора можна варіювати шляхом зміни геометричних параметрів маховика.

Варто зазначити, що аналітично можна визначити момент інерції обертових мас на валу ротора без врахування масивного маховика (рис. 3):

$$J_2^* = J_2 - J_M, \quad (3)$$

де J_M – момент інерції маховика.

Для уточнення інерційних характеристик привода та верифікації результатів, отриманих методом вільного вибігу, було проведено аналітичний розрахунок осьового моменту інерції маховика (J_M). Оскільки маховик роторної дробарки має складну конфігурацію (наявність конусних поверхонь, технологічних виїмок та пазів), в основу розрахунку покладено метод геометричної декомпозиції [24, 25].

Згідно з цим методом, конструкція маховика була розділена на 15 елементарних геометричних тіл (табл. 2), для яких існують точні математичні вирази визначення маса-інерційних параметрів. До розрахункової схеми увійшли: усічені конуси (елементи №1–4), циліндри

різних радіусів (№5–11), циліндричні сегменти (№12–13) та прямокутні паралелепіпеди (№14–15).

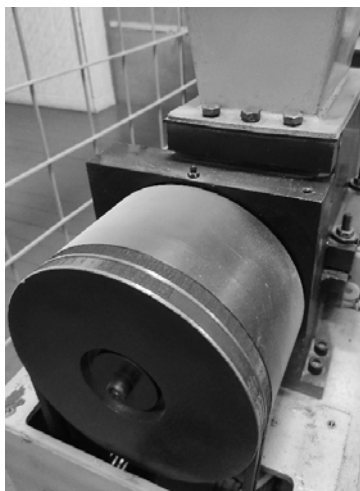
Для кожного елементарного тіла було визначено його лінійні розміри (R, r, h), розраховано масу (m) з урахуванням густини матеріалу (ρ) та осьовий момент інерції, приведений до осі обертання маховика. Детальні вирази для кожного типу тіла наведено в табл. 2.

Загальний осьовий момент інерції маховика (J_M) обчислювався шляхом алгебраїчного додавання моментів інерції суцільних тіл та віднімання моментів інерції порожнин або виїмок:

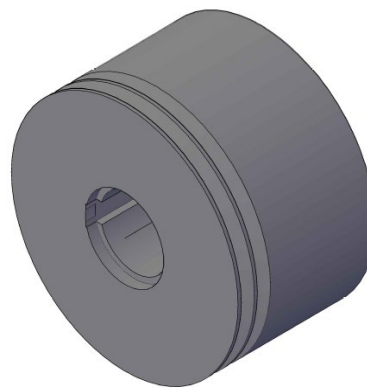
$$J_M = \sum_{i=1}^9 J_i - \sum_{i=10}^{11} J_i + \sum_{i=12}^{13} J_i - \sum_{i=14}^{15} J_i$$



Рис. 2. Графік залежності кутової швидкості вала ротора дробарки від часу при самогальмуванні привода до повної зупинки



а



б

Рис. 3. Маховик роторної дробарки: а – зовнішній вигляд; б – тривимірна модель

За результатами аналітичного розрахунку визначено, що осьовий момент інерції маховика становить $J_M = 0,291 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Це дозволило, згідно з виразом (3), відокремити інерційний вплив маховика від загального моменту інерції оберткових мас на валу ротора (J_2), визначеного експериментально.

Використання запропонованої методики дозволило не лише отримати точне значення J_M , а й реалізувати можливість варіювання інерційними характеристиками на етапі проєктування. Змінюючи геометричні розміри (радіуси або висоти) окремих

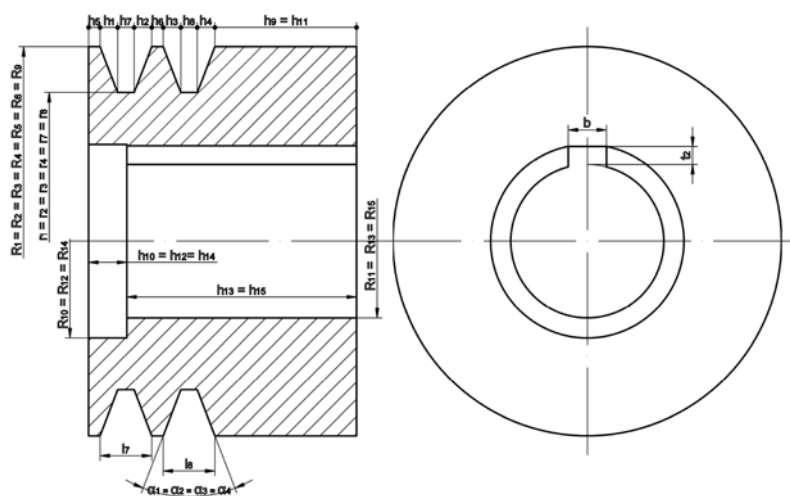
елементів (№1–15), можна оптимізувати сумарний момент інерції привода для забезпечення стабільної роботи дробарки під час ударних навантажень без перевантаження електродвигуна привода.

Така комбінація методів підтверджує можливість точного інженерного розрахунку параметрів привода, що є необхідним для розроблення адекватних математичних моделей динаміки дробарки та запобігання аварійним режимам роботи.

Висновки. Виконані дослідження показують, що найбільш прийнятним та ефективним спо-

Таблиця 2

Геометричні параметри маховика роторної дробарки



Номери тіл	Назви тіл	Розміри тіл, мм	Вирази для визначення маса-інерційних параметрів тіл	Значення осьових моментів інерції тіл, $10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
1	2	3	4	5
1(2, 3, 4)	Усечений конус	$R_1 = \frac{231,5}{2},$ $r_1 = \frac{207,5}{2},$ $\alpha_1 = 42^\circ,$ $h_1 = (R_1 - r_1) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right).$	$J_1 = \frac{3}{10} \cdot m_1 \cdot \left(\frac{R_1^5 - r_1^5}{R_1^3 - r_1^3}\right),$ $m_1 = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot h_1 \cdot (R_1^2 + R_1 \cdot r_1 + r_1^2).$	8,237
5 (6)	Циліндр	$R_5 = \frac{231,5}{2},$ $h_5 = 3.$	$J_5 = \frac{1}{2} \cdot m_5 \cdot R_5^2,$ $m_5 = \rho \cdot \pi \cdot h_5 \cdot R_5^2.$	6,598
7 (8)	Циліндр	$R_7 = \frac{207,5}{2},$ $l_7 = 13,5,$ $h_7 = l_7 - 2 \cdot h_1.$	$J_7 = \frac{1}{2} \cdot m_7 \cdot R_7^2,$ $m_7 = \rho \cdot \pi \cdot h_7 \cdot R_7^2.$	6,086
9	Циліндр	$R_9 = \frac{231,5}{2},$ $h_9 = 107.$	$J_9 = \frac{1}{2} \cdot m_9 \cdot R_9^2,$ $m_9 = \rho \cdot \pi \cdot h_9 \cdot R_9^2.$	0,322
10	Циліндр	$R_{10} = \frac{80,5}{2},$ $h_{10} = 10.$	$J_{10} = \frac{1}{2} \cdot m_{10} \cdot R_{10}^2,$ $m_{10} = \rho \cdot \pi \cdot h_{10} \cdot R_{10}^2.$	1,967
11	Циліндр	$R_{11} = \frac{70}{2},$ $h_{11} = 107.$	$J_{11} = \frac{1}{2} \cdot m_{11} \cdot R_{11}^2,$ $m_{11} = \rho \cdot \pi \cdot h_{11} \cdot R_{11}^2.$	0,000310

1	2	3	4	5
12	Сегмент циліндричний	$R_{13} = \frac{70}{2},$ $R_{12} = \frac{80,5}{2},$ $h_{12} = 10,$ $t_2 = 4,9,$ $\alpha_{12} = \arccos\left(\frac{R_{13}+t_2}{R_{12}}\right).$	$J_{12} = \frac{1}{12} \cdot m_{12} \cdot R_{12}^2 \cdot$ $\left(\frac{12 \cdot \alpha_{12} - 4 \cdot \sin(2 \cdot \alpha_{12}) - \sin(4 \cdot \alpha_{12})}{2 \cdot \alpha_{12} - \sin(2 \cdot \alpha_{12})}\right),$ $m_{12} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h_{12} \cdot R_{12}^2 \cdot (2 \cdot \alpha_{12} - \sin(2 \cdot \alpha_{12})).$	0,023470
13	Сегмент циліндричний	$R_{13} = \frac{70}{2},$ $h_{13} = 130,$ $b = 20,$ $\alpha_{13} = \arcsin\left(\frac{b}{2 \cdot R_{13}}\right).$	$J_{13} = \frac{1}{12} \cdot m_{13} \cdot R_{13}^2 \cdot$ $\left(\frac{12 \cdot \alpha_{13} - 4 \cdot \sin(2 \cdot \alpha_{13}) - \sin(4 \cdot \alpha_{13})}{2 \cdot \alpha_{13} - \sin(2 \cdot \alpha_{13})}\right),$ $m_{13} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h_{13} \cdot R_{13}^2 \cdot (2 \cdot \alpha_{13} - \sin(2 \cdot \alpha_{13})).$	0,002261
14	Прямокутний паралелепіпед	$R_{14} = \frac{80,5}{2},$ $R_{15} = \frac{70}{2},$ $h_{14} = 10,$ $t_2 = 4,9,$ $b = 20,$ $\alpha_{14} = \arcsin\left(\frac{b}{2 \cdot R_{14}}\right),$ $a_{14} = R_{15} + t_2 - R_{14} \cdot \cos(\alpha_{14}).$	$J_{14} = \frac{1}{12} \cdot m_{14} \cdot (a_{14}^2 + b^2) + m_{14} \cdot$ $\left(\frac{1}{2} \cdot a_{14} + \sqrt{R_{14}^2 - \frac{b^2}{4}}\right)^2,$ $m_{14} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h_{14} \cdot a_{14} \cdot b.$	0.178623
15	Прямокутний паралелепіпед	$R_{15} = \frac{70}{2},$ $h_{15} = 130,$ $t_2 = 4,9,$ $b = 20,$ $\alpha_{15} = \arcsin\left(\frac{b}{2 \cdot R_{15}}\right),$ $a_{15} = t_2 \cdot (1 - \cos(\alpha_{15})).$	$J_{15} = \frac{1}{12} \cdot m_{15} \cdot (a_{15}^2 + b^2) + m_{15} \cdot$ $\left(\frac{1}{2} \cdot \left(R_{15} + t_{15} + \sqrt{R_{15}^2 - \frac{b^2}{4}}\right)\right)^2,$ $m_{15} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h_{15} \cdot a_{15} \cdot b.$	0,322
Осьовий момент інерції маховика $J_M = \sum_{i=1}^9 J_i - \sum_{i=10}^{11} J_i + \sum_{i=12}^{13} J_i - \sum_{i=14}^{15} J_i = 0,291 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$				

собом визначення моменту інерції обертових мас привода роторної дробарки без проведення складного демонтажу обладнання є експериментальний метод вільного вибігу. В ході випробувань встановлено, що за потужності холостого ходу 180 Вт та кутовій швидкості вала електродвигуна 146,084 рад/с час повного самогальмування системи до зупинення становить 40,813 секунд. Ці показники дозволили розрахувати експериментальний момент інерції всього привода, який складає 0,688 кг·м², та виділити момент інерції безпосередньо на валу ротора, що дорівнює 0,917 кг·м². Для деталізації інерційного внеску масивного маховика було застосовано аналітичний метод геометричної декомпозиції, згідно з яким складну форму виробу було розділено на 15 елементарних геометричних тіл, включаючи усічені конуси, циліндри, прямокутні паралеле-

піпеди тощо. За результатами розрахунку сумарний осьовий момент інерції маховика склав 0,291 кг·м², що підтверджує можливість точного відокремлення інерції махових мас від загального моменту інерції ротора. Точне визначення цих параметрів є важливим для розроблення адекватних математичних моделей динаміки привода, які дозволяють прогнозувати поведінку системи під час пікових навантажень для подрібнення відходів полімерів, зокрема під час подрібнення великих шматків полімерних відходів, та запобігати аварійним режимам роботи електродвигуна. Такий комплексний підхід надає можливість інженерам на етапі проєктування та модернізування варіювати маса-інерційними характеристиками окремих елементів з метою підвищення енергоефективності та загальної надійності обладнання.

Список літератури:

1. Мікульонюк І. О. Управління великотоннажними твердими побутовими та промисловими відходами : монографія. Київ : Ін-т газу НАНУ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 362 с.
2. Bishop G., Styles D., Lens P. N. L. Recycling of European plastic is a pathway for plastic debris in the ocean. *Environment International*. 2020. Vol. 142. Article 105893. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105893>
3. Рубанка М. М. Математичне моделювання динаміки роторної дробарки для переробки відходів легкої промисловості. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2015. № 6 (92). С. 107–114.

4. Єршомін П. М., Кириченко А. М., Гречка А. І. та ін. Сучасний стан та перспективи розвитку пристроїв для механічного подрібнення пластикових відходів 3D друку під час їх вторинної переробки. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки* : зб. наук. пр. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. Вип. 11 (42), ч. 2. С. 117–126.
5. Скиба М. Є. Обладнання для переробки відходів : монографія. Хмельницький : ПП Ковальський В. В., 2004. 124 с.
6. Рубанка М. М., Місяць В. П. Відходи легкої промисловості, способи переробки і області подальшого використання. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2015. № 4 (88). С. 34–39.
7. Саленко Ю. С. Обладнання для подрібнення матеріалів: дробарки та млини : навч. посіб. Кременчук : КДПУ, 2008. 100 с.
8. Бурмістенков О. П., Місяць В. П., Панасюк І. В., Злотенко Б. М. Переробка відходів гуми та термопластичних матеріалів : монографія. Київ : Кафедра, 2012. 240 с.
9. Піпа Б. Ф., Рубанка М. М., Музичишин С. В. Аналіз доцільності використання пристрою з пружиною кручення для зниження динамічних навантажень в приводі технологічного обладнання та вибір його параметрів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2014. № 3 (77). С. 209–215.
10. Піпа Б. Ф., Хомяк О. М., Павленко Г. І. Динаміка круглов'язальних машин. Київ : КНУТД, 2005. 294 с.
11. Хомяк О. М. Динаміка плосков'язальних машин та автоматів. Київ : КНУТД, 2008. 250 с.
12. Чабан В. В., Бакан Л. А., Піпа Б. Ф. Динаміка основ'язальних машин. Київ : КНУТД, 2012. 287 с.
13. Місяць В. П., Рубанка М. М. Експериментальна установка для дослідження динамічних характеристик роторної ножової дробарки. *Праці Одеського політехнічного університету*. Одеса, 2014. Вип. 1 (43). С. 78–82.
14. Лавріненко Ю. М., Марченко О. С., Савченко П. І. та ін. Електропривод : підручник / за ред. Ю. М. Лавріненка. Київ : Ліра-К, 2009. 504 с.
15. Лавріненко Ю. М., Савченко П. І., Синявський О. Ю., Войтюк Д. Г., Савченко В. В., Голодний І. М. Основи електропривода : підручник. Київ : Ліра-К, 2017. 524 с.
16. Лавріненко Ю. М., Савченко П. І., Синявський О. Ю., Войтюк Д. Г., Савченко В. В., Голодний І. М. Основи електропривода : підручник. Київ : Ліра-К, 2021. 532 с.
17. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Ч. 1 : навч. посіб. Вінниця : ВНАУ, 2020. 387 с.
18. Колб А. А., Колб А. А. Теорія електроприводу : навч. посіб. 2-ге вид., перероб. і допов. Дніпро : Нац. гірничий ун-т, 2011. 540 с.
19. Яким Р. С. Приводи транспортних машин : навч. посіб. Дрогобич : РВВ ДДПУ ім. Івана Франка, 2020. 240 с.
20. Борозенець Г. М., Павлов В. М., Семак І. В. Деталі машин : навч. посіб. Київ : Кондор, 2021. 220 с.
21. Міняйло А. В., Тіщенко Л. М., Мазоренко Д. І. та ін. Деталі машин : підручник. Київ : Агроосвіта, 2013. 448 с.
22. Коновалюк Д. М., Ковальчук Р. М. Деталі машин. Київ : Кондор, 2005. 584 с.
23. Піпа Б. Ф., Хомяк О. М., Марченко А. І. Деталі машин. Київ : КНУТД, 2011. 358 с.
24. Орловський Б. В., Дворжак В. М. Розрахунок голок швейних машин на міцність. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем* : матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. (19–22 трав. 2015 р., Чернігів). Чернігів : ЧНТУ, 2015. С. 155.
25. Дворжак В. М., Орловський Б. В. Експериментальне визначення маса-інерційних параметрів рухомих триповодкових ланок механізмів технологічних машин. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*. 2015. № 2 (84). С. 56–62.

Rubanka M.M., Dvorzhak V.M., Zaliubovskyi M.H., Nychehlod V.V., Dromenko V.B.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE MOMENT OF INERTIA OF THE ROTATING MASSES ON THE ROTOR SHAFT OF A ROTARY CRUSHER FOR THE PROCESSING OF POLYMER WASTE

This article presents the results of experimental studies aimed at determining the moment of inertia of the rotating masses in the drive system of a rotary knife crusher used for processing polymer waste. The necessity of accurately knowing the inertial parameters is justified for the development of adequate mathematical models of the drive dynamics and the rational selection of the flywheel's design parameters, which allows minimising the impact of significant dynamic loads during transient operating modes of the rotary crusher.

Particular attention is paid in this work to the method for determining the axial moment of inertia of complex constructional elements of the rotary crusher, in particular the massive flywheel. The authors have implemented a comprehensive approach combining: the experimental free-running (self-braking) method, which allows the total moment of inertia of the system to be determined without complex dismantling of the equipment, based on the idling power consumption and the time required for the rotor to come to a complete stop, and an analytical method for determining the axial moment of inertia by decomposing the complex geometry of the flywheel into elementary geometric bodies (truncated cones, cylinders, cylindrical segments, rectangular parallelepipeds, etc.). Detailed calculation expressions are provided for each of these elements, which made it possible to obtain the exact value of the flywheel's axial moment of inertia ($J_M = 0.291 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$) and separate it from the total moment of inertia of the rotating masses on the rotor shaft.

The results obtained confirm that it is possible to vary the inertial characteristics of a rotary knife crusher drive by altering the geometric parameters of individual components in order to improve the energy efficiency of the crushing process.

Keywords: rotary knife crusher, moment of inertia, free-running method, flywheel, geometric parameters, processing of polymer waste, drive dynamics, energy efficiency.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 621.77:669.14-41

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/03>**Рудасьов В.Б.**<https://orcid.org/0000-0002-2763-3372>

Відокремлений структурний підрозділ

«Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки

Українського державного університету науки і технологій»

Головіна О.В.<https://orcid.org/0000-0002-9858-888X>

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

Якубовський О.М.<https://orcid.org/0009-0003-9135-4153>

Відокремлений структурний підрозділ

«Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки

Українського державного університету науки і технологій»

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ПРИ ШТАМПУВАННІ ТОНКОЛИСТОВИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ І ЙОГО ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК З ВЛАСТИВОСТЯМИ МАТЕРІАЛУ

У статті представлена модель процесу листового штампування-витягу тонколистової сталі, яка використовується для виготовлення деталей автомобіля. Розглянута модель дозволяє дослідити напружено-деформований стан при штампуванні тонколистової сталі, його взаємозв'язок із властивостями матеріалу та розрахувати зусилля і граничний витяг при заданих властивостях металу і характеристик тертя.

Дослідження охоплює низьколеговані сталі підвищеної міцності та сталь 08Ю. Проведено порівняння властивостей до та після деформації. Основна увага приділена визначенню зон деформації у циліндричному елементі: зона пластичної деформації, зона вигину, зона пружної деформації та зона руйнування. Для кожної зони встановлено характер напружень та їх вплив на загальне зусилля витягу.

Модель враховує нормальні та тангенціальні напруження у фланці, тертя у фланці та на закругленні матриці, згин заготовлі, а також зміцнення металу під час деформації. Використано гіпотези пластичності, зокрема теорію максимальних дотичних напружень та енергетичну гіпотезу, що дозволяє адекватно описати перехід металу у пластичний стан.

Для оцінки штампування тонколистової сталі використовувався коефіцієнт граничної деформації, який, розраховувався аналітично та пройшов перевірку експериментально, показавши надійність моделі, близьку відповідність реальному процесу штампування і експресність. Досліджені і проведені порівняльні властивості низьколегованих сталей підвищеної міцності до і після деформації. Проведено статистичну обробку кількості вимірювань діаметра фланця (D_f) після проведення випробувань на штампування.

Дослідження демонструє вплив властивостей матеріалу, конструкції інструменту, зусилля притиску та умов тертя на здатність матеріалу до витяжки, що в свою чергу має значення для оптимізації технології штампування автомобільних деталей із сталей підвищеної міцності.

Ключові слова: напружено-деформований стан, властивості металу, зусилля, граничний витяг, коефіцієнт граничної деформації.

Постановка проблеми. Підвищення штампуємості, у тому числі і сталей підвищеної міцності (СПМ), є проблемою, що охоплює металургійне і листопрокатне виробництво, роботові пресових цехів і конструкторських бюро автомобільних заводів. При оцінці штампування виникають

труднощі, пов'язані зі встановленням локальних порушень, що роблять вирішальний вплив на течію процесу. Важливого значення при цьому набувають як експериментальні, так і теоретичні методи дослідження. Поставлена проблема обґрунтовує вибір міри складності деталей, для

виготовлення яких придатні сталі різних класів; обґрунтовує розширення номенклатури деталей із СПМ і заходь, що підвищують штампування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні питаннями застосування сталей високої міцності під час виготовлення транспортних засобів займаються багато вчених. Дослідники в роботах схиляються до висновку, що основною сучасною тенденцією в автомобілебудуванні є зниження ваги при збереженні високої безпеки. У автомобілебудуванні це завдання вирішується шляхом застосування низьколегованих сталей підвищеної міцності [1, с.17], міцнісні характеристики яких у півтора рази вище застосовуваних в даний час для холодного листового штампування, маловуглецевих сталей типу 08. Оцінка штампування листової сталі за показниками, передбаченими діючими стандартами, не відображає фактичного штампування. Розширення застосування сталей підвищеної міцності для деталей автомобілів, що штамнуються, вимагає знаходження з існуючих ефективних експресних методів оцінки їх штампування, потрібна так само і об'єктивна оцінка властивостей цих сталей у порівнянні з застосовуваними.

Постановка завдання. Провести повний аналіз напружено-деформованого стану випробовуваної заготовки з метою визначитися з усіма чинниками, що впливають на операції штампування-витягу.

Виклад основного матеріалу. Процес листового штампування-витягу в основному відбиває закономірності витягу переважної більшості реальних деталей і в теж годину легко піддається математичному опису і прогнозуванню. Найбільш прийнятний метод спільного рішення рівнянь рівноваги і пластичності з урахуванням основних чинників деформації. Проте вибір граничних умов і форми при витягу СПМ в результаті інших початкових посилок відрізнятиметься від описаного в літературі [2...4]. Такий підхід дозволяє врахувати нові чинники і більш повно відбити фізичну суть процесу штампування-витягу, встановити характер і міру впливу врахованих властивостей матеріалу на технологічні параметри і граничні можливості процесу.

Загальне зусилля витягу можна розкласти на ряд складових, визначуваних наступними чинниками:

- тертям у фланці;
- тертям на закругленні матриці;
- деформацією фланця;
- вигином заготовки на вході і виході з матриці.

Розглядаючи простий випадок витягу циліндричного стаканчика, рис. 1, можна розділити весь об'єм, що деформується, на зони.

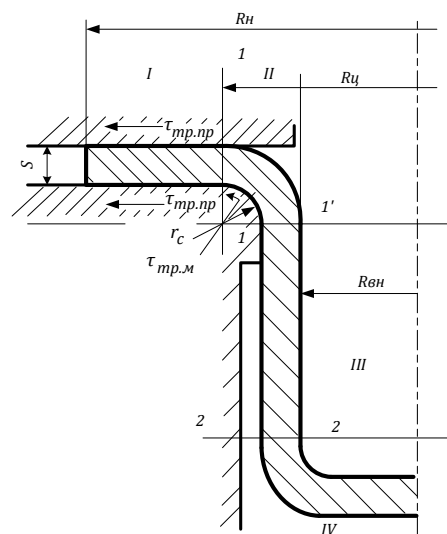


Рис. 1. Схема розподілу зон деформацій і напруги у стаканчика при витягу:
I – зона пластичної деформації; II – зона пластичного вигину; III – зона пружної деформації; IV – зона руйнування

Зона I є зоною пластичної деформації за схемою стискування-розтягування, зона II – зоною вигину, зона III – зоною пружної деформації і зона IV – у кінці процесу може статися руйнування зразка (заготовки, деталі).

У зоні I. Від кромки заготовки до перерізу 1-1, тобто в зоні притиску – напруга розтягування в радіальному (σ_r) і стискування в тангенціальному (σ_θ) напрямках. Спільна дія цієї напруги забезпечує втягування фланця в отвір матриці. У цій же зоні діє також напруга, викликана тертям між заготовкою, притиском і матрицею на плоскій її частині ($\sigma_{тр,ф}$) [5, с.11].

У зоні II. На закругленні (згині) матриці діє напруга, викликана тертям заготовки на закругленні матриці ($\sigma_{тр,м}$) [6, с.10] і напруга вигину ($\sigma_{виг}$).

У зоні III. У циліндричній частині стаканчика по перерізу 1'-1' має місце лінійний напружений стан. Причому напруга розтягування свідомо менше напруги плинності, якщо не відбувається руйнування.

У зоні IV. Дно стаканчика знаходиться в плоско-напруженому стані (розтягування), а оскільки напруга, що створюється торцем пуансона, незначна, то їм можна нехтувати (дно стаканчика схильне до плоского напруженого стану).

в 1...3% і стоншування в 2...5%) [3 с. 210; 8, с. 35; 9, с. 20].

Загальна напруга в стінці стаканчика визначається напругою, діючою в зонах I і II. Назвемо його загальною напругою втягування заготівлі в матрицю [5, с.10; 6, с.11]:

$$\sigma_{\text{заг}} = \sigma_p + \sigma_{\text{изг}} + \sigma_{\text{тр.ф}} + \sigma_{\text{тр.м}}, \quad (1)$$

де σ_p – нормальна розтягуюча напруга, діюча в радіальному напрямі фланця, затиснутого між притиском і матрицею, МПа;

$\sigma_{\text{виг}}$ – напруга вигину на матриці на вході і виході, МПа;

$\sigma_{\text{тр.ф}}$ – напруга тертя у фланці, МПа;

$\sigma_{\text{тр.м}}$ – напруга тертя на закругленні матриці, МПа.

Кожну складову загальної напруги ($\sigma_{\text{заг}}$ встановимо аналітичним шляхом, приймаючи певні допущення. Напруги, які пов'язані з умовами тертя, що виникають у фланці ($\sigma_{\text{тр.ф}}$) і на закругленні матриці ($\sigma_{\text{тр.м}}$) були розглянуті в попередніх роботах [5, 6].

Під дією пуансона заготівля втягується в матрицю, що викликає появу у фланці розтягуючої напруги σ_p , діючої в радіальному напрямі. Одночасно виникає стискуюча напруга σ_θ , діюча в тангенціальному напрямі. Нехтуючи дією нормальної і дотичної напруги на поверхні фланця при визначенні σ_p і σ_θ , вважаємо, що схема напруженого стану у фланці буде плоскою різнойменною. Товщину заготівлі рахуємо незмінній і рівній початковій товщині s . Для знаходження поля напруги у фланці вирішуємо спільно рівняння рівноваги і пластичності [2, 3, 8, 9].

З урахуванням осової симетрії деформації, рівняння рівноваги для заготівлі постійної товщини в зоні I запишеться у вигляді [8, с. 28; 9, с. 18]:

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \sigma_p - \sigma_\theta = 0. \quad (2)$$

У усіх рівняннях рівноваги для плоского напруженого стану при листовому штампуванні є дві невідомі напруги σ_p і σ_θ . Для знаходження їх необхідно мати друге рівняння, яке доповнюється умовою пластичності:

$$\sigma_p - \sigma_\theta = \beta \sigma_s \quad (3)$$

Умови пластичності встановлюють співвідношення між напругою, при якій метал переходить з пружного стану в пластичний, тому ці умови називають також і граничним станом тіла. З наявних теорій (гіпотез) за визначенням умов пластичності найбільше поширення в листовому штампуванні отримали теорії максимальної дотичної напруги і енергетична.

Згідно першої теорії пластичний стан тіла настає і підтримується тоді, якщо одна з різниць двох головних нормальних напруги σ_1 і σ_2 дорівнює напрузі плинності σ_s незалежно від значень двох інших різниць головної напруги, має вигляд

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s, \quad (4)$$

де σ_1, σ_3 – головні нормальні напруги;

σ_s – напруга плинності металу.

Щодо полярних координат

$$\sigma_p - \sigma_\theta = \sigma_s. \quad (5)$$

Ця умова пластичності застосовується тільки для плоского напруженого стану, тому що в ньому не враховується вплив середнього за величиною напруги.

Друга теорія (енергетична) – умова сталості питомої енергії зміни форми. Згідно з цією теорією (гіпотези) передбачається, що для переходу металу в пластичний стан необхідно накопичити в одиниці обсягу речовини деяку постійну кількість потенційної енергії незалежно від схеми напруженого стану. Ця умова пластичності у загальному випадку для об'ємної схеми напруженого стану буде

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s, \quad (6)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні нормальні напруги.

Підставивши у формулу (6) замість $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ напруги $\sigma_p, \sigma_z, \sigma_\theta$, отримаємо умову пластичності у полярних координатах. Рівняння (6) також показує, що при пластичному стані інтенсивність напруг σ_i дорівнює напрузі плинності σ_s . Цією умовою враховується і вплив середньої головної напруги σ_2 , яка знаходиться в межах $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ чи $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$. У цьому слід враховувати як їхню абсолютну величину, а й знаки напруг, т. е. розглядати алгебраїчну величину напруг.

При $\sigma_1 = \sigma_2$ або $\sigma_3 = \sigma_2$ рівняння (6) набуває вигляду рівняння (4). Отже, у цих випадках рівняння пластичності з теорії найбільших дотичних напруг збігається з умовою пластичності з енергетичної теорії, тобто є його окремим випадком.

При середньому значенні $\sigma_1 = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ рівняння (6) набуває більш спрощеного вигляду

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s = \beta \sigma_s. \quad (7)$$

Стосовно полярних координат це формула (3). Тут β – коефіцієнт, що враховує вплив середньої головної напруги σ_2 (або σ_z) і коливається в межах від $\beta = 1$, коли дві напруги рівні між собою, до $\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15$ – при плоскій деформації.

Напруга плинності металу входить у розрахункові рівняння. Практичне його визначення ста-

новить значні труднощі. Однак у межах помилки вимірювання звичайних випробувальних машин σ_s може бути прийнятий рівною умовній межі плинності $\sigma_{0,2}$. Тому далі в розрахунках замість фізичної межі плинності при розтягуванні може використовуватися експериментальне значення умовної межі плинності.

Як говорилося вище для знаходження поля напруги у фланці необхідно вирішити спільно рівняння пластичності (3) та рівняння рівноваги (2).

Розтягуючі напруги σ_p , викликані тиском пуансона у краю заготовки, дорівнюють нулю; у міру віддалення від краю заготовки до центру матриці вони зростають, досягаючи найбільшої величини на вхідній кромці матриці. Стисливі напруги σ_θ , навпаки, у зовнішнього краю мають найбільшу величину, а в міру віддалення від краю заготовки зменшуються.

Вирішуємо умови рівноваги.

Підставляючи (2) до (3), отримаємо

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \beta\sigma_s = 0. \quad (8)$$

Розділяючи змінні ρ і σ_p , отримаємо

$$d\sigma_p = -\beta\sigma_s \frac{d\rho}{\rho}. \quad (9)$$

Інтегруємо рівняння (9)

$$\int d\sigma_p = \int -\beta\sigma_s \frac{d\rho}{\rho},$$

$$\sigma_p = -\beta\sigma_s \ln \rho + C. \quad (10)$$

Використовуючи для визначення постійної інтегрування граничні умови для початкового моменту витяжки (на вільній кромці заготовки $\rho = R_n$, напруги $\sigma_p = 0$), отримаємо:

$$0 = -\beta\sigma_s \ln R_n + C,$$

$$C = \beta\sigma_s \ln R_n. \quad (11)$$

Підставляючи вираз (11) у формулу (10), отримаємо нормальні розтягуювальні напруги:

$$\sigma_p = -\beta\sigma_s \ln \rho + \beta\sigma_s \ln R_n.$$

$$\sigma_p = \beta\sigma_s \ln \frac{R_n}{\rho}.$$

У перерізі 1-1:

$$\sigma_p = \beta\sigma_s \ln \frac{R_n}{R_n}. \quad (12)$$

Тангенціальні стискаючі напруги отримуємо, підставивши в рівняння пластичності (3) значення σ_p :

$$\sigma_\theta = \beta\sigma_s \left(\ln \frac{R_n}{R_n} - 1 \right)$$

або

$$\sigma_\theta = 1,1\sigma_s \left(\ln \frac{R_n}{R_n} - 1 \right). \quad (13)$$

Характер розподілу напруги σ_p і σ_θ по фланцю заготовки можна визначити, задаючись значеннями ρ в межах від R_{cp} до R_n .

При переході від фланця до вертикальної стінки склянки ($\rho = R_{cp}$), нормальна розтягуюча напруга не повинна перевищувати значення межі плинності ($\sigma_p < 1,1\sigma_s$). Використовуючи формулу (12), можна за заданого діаметра заготовки D і $\sigma_p = 1,1\sigma_s$ знайти величину граничного значення ступеня витяжки без руйнування $K_{np} = R_n / R_{cp} = D_n / D_{cp}$. Отримуємо $\ln(R_n/R_{cp}) = 1$, а $K_{np} = 2,72$. Ця витяжка досяжна за відсутності наклепу та тертя. Майже максимальне значення $K_{np} = 2,22 \dots 2,32$ [7, с. 650].

Втрати на тертя фланця заготовки про матрицю і притиск, тертя на згинанні заготовки на закругленні матриці представлено роботах [5, 6]. Сам вигин заготовки по матриці та зміцнення металу при деформуванні належить визначити.

Напругу від вигину заготовки на закругленні матриці $\sigma_{виг}$ визначаємо за умовами сталості робіт зовнішніх і внутрішніх сил, витрачених на вигин матеріалу з витяжної кромки матриці. Приймаємо згинальний момент, що діє на переході від плоскої частини фланця до закругленої, що дорівнює моменту для пластичного згинання смуги без зміцнення металу і за відсутності поздовжніх сил.

Момент внутрішніх сил при згинанні прямокутної смуги шириною b дорівнює:

$$M_{зг. внутр} = \sigma_s \frac{b \cdot s^2}{4}. \quad (14)$$

де b – ширина зразка, у разі довжина кола, рівна $2\pi R_n$, мм;

s – товщина зразка, мм.

При згинанні смуги шириною $b = 1$ при переході з перерізу 1-1 до перерізу 1'-1' (рис. 1) витрачається робота, що дорівнює добутку сили на шлях:

$$A_1 = \sigma_{зг} s R_p d\gamma. \quad (15)$$

Ця робота дорівнює згинальному моменту, помноженому на кут повороту осі $d\gamma$:

$$A_1 = A_2 = \sigma_s \left(\frac{b \cdot s^2}{4} \right) d\gamma. \quad (16)$$

Звідси

$$b\sigma_{зг} s R_p d\gamma = \sigma_s \left(\frac{b \cdot s^2}{4} \right) d\gamma.$$

$$\sigma_{зг} = \sigma_s \left(\frac{b \cdot s}{4 \cdot R_n} \right). \quad (17)$$

Розгин перетину вимагатиме того ж додаткового зусилля, тоді:

$$\sigma_{зг} = \sigma_s \left(\frac{s}{4 \cdot R_n} \right) = \sigma_s \left(\frac{s}{2 \cdot r_m + s} \right). \quad (18)$$

Підсумовуючи відповідно до рівняння (1) отримані значення (12) –

$$\sigma_p = \beta \sigma_s \ln \frac{R_n}{R_u}, (18) - \sigma_{3r} = \sigma_s \left(\frac{s}{2 \cdot r_m + s} \right), (10) [5] -$$

$$\sigma_{тр.ф} = \frac{f_{тр} \cdot Q_{пр}}{A \cdot (R_u + r_m) \cdot s}, (9) [6] - \sigma_{тр.м} = \frac{\ddot{A} \cdot r_m}{2 \cdot s}$$

отримаємо

$$\sigma_{3ar} = \beta \sigma_s \ln \frac{R_n}{R_u} + \sigma_s \left(\frac{s}{2 \cdot r_m + s} \right) + \frac{f_{тр} \cdot Q_{пр}}{\pi \cdot (R_u + r_m) \cdot s} + \tau_{тр.м} \frac{\pi \cdot r_m}{2 \cdot s}. (19)$$

Очевидно, що умови руйнування відповідають виразу

$$\sigma_{3ar} \geq \sigma_b. (20)$$

Якщо підставити (20) на (19) і перетворити, отримаємо

$$\ln \frac{R_n}{R_u} \geq \frac{\sigma_b}{\beta \sigma_s} - \frac{s}{\beta (2 \cdot r_m + s)} - \frac{f_{тр} \cdot Q_{пр}}{\beta \sigma_s \pi \cdot (R_u + r_m) \cdot s} - \tau_{тр.м} \frac{\pi \cdot r_m}{\beta \sigma_s 2 \cdot s}, (22)$$

де R_n – зовнішній радіус переміщеного залишкового фланця;

R_u – умовний радіус отвору матриці;

σ_b – тимчасовий опір розриву;

σ_s – фізична межа плинності, поточне значення;

β – коефіцієнт Лоде, що враховує вплив нормальних напруг σ_n і дорівнює 1,00...1,15;

$Q_{пр}$ – зусилля притиску;

$f_{тр}$ – коефіцієнт тертя;

r_m – радіус закруглення кромки матриці;

s – товщина заготовки;

$\tau_{тр.м}$ – напруга тертя на закругленні матриці.

З отриманого рівняння (22) випливає, що на граничну деформацію при глибокій витяжці впливають:

– властивості матеріалу заготовки, що характеризуються в рівнянні напругою плинності σ_s та тимчасовим опором σ_b ;

– конструкція штампкової оснастки, яка врахована радіусом матриці інструменту r_m ;

– умови тертя, які враховані коефіцієнтом тертя – $f_{тр}$, викликане силою притиску $Q_{пр}$ між заготовкою, притиском і площиною матриці та напругою тертя на згині матриці – $\tau_{тр.м}$;

– товщина матеріалу заготовки s .

Таким чином, на здатність матеріалу до витяжки впливають властивості матеріалу, геометрія інструменту, зусилля притиску, а також сумарний вплив умов тертя, що виникають у різних режимах. Штampuвання моделі – циліндричного стаканчика, до моменту розриву є основним

для комплексного методу оцінки як властивостей металу, так і складної дії умов тертя.

Вище наведено розрахунок зусилля штампування-витяжки без урахування зміцнення металу у процесі деформації. Для обліку, спрощуючи завдання, приймемо зміцнення у фланці та на радіусі матриці однаковими. Приймемо значення фізичної межі плинності σ_s у будь-який момент деформації як функцію від величини деформації ϵ та вихідного значення межі плинності $\sigma_{пл0}$.

Лінійна апроксимація кривої зміцнення (23), що дозволяє у ряді випадків отримувати досить прості рішення, водночас найменш точна. Найбільші розбіжності між дійсною кривою зміцнення та її лінійною. При аналізі операцій листового штампування найбільш поширені такі апроксимуючі криві зміцнення функції [3, с. 80; 7, с. 300; 8, с. 60]:

лінійна апроксимація виду:

$$\sigma_s = \sigma_{пл0} + \Pi' \epsilon, (23)$$

статечна апроксимація першого виду:

$$\sigma_s = A(\epsilon)^n, (24)$$

статечна апроксимація другого виду:

$$\sigma_s = \sigma_{пл0} + A(\epsilon)^{n1}. (25)$$

апроксимацією мають місце при невеликих деформаціях, що відповідають рівномірному деформуванню в умовах лінійного розтягування.

Статечна апроксимація першого виду (24) значно точніше відповідає реальним кривим зміцнення. Проте та обставина, що вона фіксує наявності межі плинності (фізичного чи умовного), призводить до неточності розрахункових значень напруги плинності при малих пластичних деформаціях поблизу деформацій, відповідних межі плинності. Якщо лінійна апроксимація кривої зміцнення в області малих пластичних деформацій дає завищення значення напруги плинності, то статечна апроксимація першого виду в тій же області дає зменшення порівняно з дійсними значеннями напруги плинності.

Досліджувані низьколеговані СПМ, що застосовуються для штампування деталей автомобілів, а також сталь 08Ю практично не мають «майданчика» плинності, тому як вихідне рівняння, що описує зміцнення, приймаємо апроксимацію другого виду (25) [8, с. 62]. Фактичні значення коефіцієнтів для досліджуваних сталей брали в функції деформації, виражені у відсотках обтискання. Приймаємо деформацію [11, с.120; 12, с. 250]:

$$\epsilon = \frac{R_{вих} - R_u}{R_{вих}} 100.$$

Формулу (25) можна подати у вигляді:

$$\sigma_s = \sigma_{пл0} + A \left(\frac{R_{вих} - R_{н}}{R_{вих}} 100 \right)^{n1}. \quad (26)$$

Процес витяжки при прийнятій методиці випробування йде завжди до розриву $R_{вих} \geq R_{н} \geq R_{розр}$, тому з формули (26) отримаємо:

$$\sigma_s = \sigma_{пл0} \left[1 + \frac{A}{\sigma_{пл0}} \left(\frac{R_{вих} - R_{розр}}{R_{вих}} 100 \right)^{n1} \right]. \quad (27)$$

Положа $\frac{A}{\sigma_{пл0}} = a$ і $D_{розр} = D_{\phi}$, формулу (27) можна подати у вигляді:

$$\sigma_s = \sigma_{пл0} \left[1 + a \left(\frac{D_{вих} - D_{\phi}}{D_{вих}} 100 \right)^{n1} \right]. \quad (28)$$

Формулу (19) з урахуванням виразу (28) і за умови, що напруга, що розтягує в момент, коли радіус фланця дорівнює $R_{н}$, має місце напруга в стінці стаканчика, можна записати в наступному вигляді

$$\begin{aligned} \sigma_{заг} &= \beta \ln \frac{R_{н}}{R_{ц}} \sigma_{пл0} \left[1 + a \left(\frac{D_{вих} - D_{\phi}}{D_{вих}} 100 \right)^{n1} \right] + \\ &+ \sigma_{пл0} \left[1 + a \left(\frac{D_{вих} - D_{\phi}}{D_{вих}} 100 \right)^{n1} \right] \left(\frac{s}{2 \cdot r_{м} + s} \right) + \frac{f_{тр} \cdot Q_{пр}}{\pi \cdot (R_{ц} + r_{м}) \cdot s} + \tau_{тр,м} \frac{\pi \cdot r_{м}}{2 \cdot s} = \\ &= \beta \ln \frac{R_{н}}{R_{ц}} \sigma_{пл0} + \beta \ln \frac{R_{н}}{R_{ц}} \sigma_{пл0} a \left(\frac{D_{вих} - D_{\phi}}{D_{вих}} 100 \right)^{n1} + \sigma_{пл0} \left(\frac{s}{2 \cdot r_{м} + s} \right) + \\ &+ \sigma_{пл0} \left(\frac{s}{2 \cdot r_{м} + s} \right) a \left(\frac{D_{вих} - D_{\phi}}{D_{вих}} 100 \right)^{n1} + \frac{f_{тр} \cdot Q_{пр}}{\pi \cdot (R_{ц} + r_{м}) \cdot s} + \tau_{тр,м} \frac{\pi \cdot r_{м}}{2 \cdot s} = \\ &= \beta \ln \frac{R_{н}}{R_{ц}} \sigma_{пл0} + \sigma_{пл0} a \left(\frac{D_{вих} - D_{\phi}}{D_{вих}} 100 \right)^{n1} + \sigma_{пл0} \left(\frac{s}{2 \cdot r_{м} + s} \right) + \\ &\quad \left(\beta \ln \frac{R_{н}}{R_{ц}} + \frac{s}{2 \cdot r_{м} + s} \right) \frac{f_{тр} \cdot Q_{пр}}{\pi \cdot (R_{ц} + r_{м}) \cdot s} + \tau_{тр,м} \frac{\pi \cdot r_{м}}{2 \cdot s} \end{aligned} \quad (29)$$

Рівняння (29) встановлює взаємозв'язок між напругою в стінці склянки або, що теж саме, між зусиллям штампування та характеристиками матеріалу при заданих зусиллях притиску та умовах тертя.

У момент розриву $\sigma_{заг} = \sigma_{рmax} \geq \sigma_{в,н}$. З рівняння (29) знаходимо:

$$\begin{aligned} \left(\frac{D_{вих} - D_{\phi}}{D_{вих}} 100 \right)^{n1} &= \sigma_{в,н} - \beta \ln \frac{R_{н}}{R_{ц}} \sigma_{пл0} - \sigma_{пл0} \left(\frac{s}{2 \cdot r_{м} + s} \right) - \frac{f_{тр} \cdot Q_{пр}}{\pi \cdot (R_{ц} + r_{м}) \cdot s} - \\ &- \tau_{тр,м} \frac{\pi \cdot r_{м}}{2 \cdot s} / \sigma_{пл0} a \left(\beta \ln \frac{R_{н}}{R_{ц}} + \frac{s}{2 \cdot r_{м} + s} \right) = \left[\sigma_{в,н} - \frac{f_{тр} \cdot Q_{пр}}{\pi \cdot (R_{ц} + r_{м}) \cdot s} - \tau_{тр,м} \frac{\pi \cdot r_{м}}{2 \cdot s} \right. \\ &\quad \left. / \sigma_{пл0} a \left(\beta \ln \frac{R_{н}}{R_{ц}} + \frac{s}{2 \cdot r_{м} + s} \right) \right] - \frac{1}{a}. \end{aligned}$$

Якщо $R_{н} = R_{\phi}$, то після низки перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned} \left(\frac{D_{вих} - D_{\phi}}{D_{вих}} 100 \right)^{n1} &= \frac{1}{a} \left(\sigma_{в,н} - \frac{f_{тр} \cdot Q_{пр}}{\pi \cdot (R_{ц} + r_{м}) \cdot s} - \tau_{тр,м} \frac{\pi \cdot r_{м}}{2 \cdot s} \right. \\ &\quad \left. / \sigma_{пл0} a \left(\beta \ln \frac{R_{н}}{R_{ц}} + \frac{s}{2 \cdot r_{м} + s} \right) \right) - 1. \end{aligned} \quad (30)$$

При визначенні тимчасового опору наклепаного металу $\sigma_{в,н}$ у формулі (30) при витяжці в момент розриву розглянемо перетин 2-2 (рис. 2).

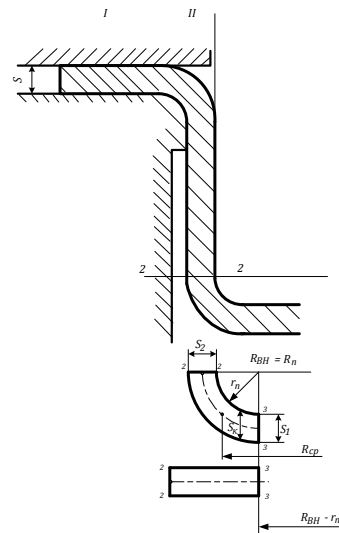


Рис. 2. Схема штампування-витяжки циліндричного стаканчика для визначення тимчасового опору наклепаного металу

Розгорнемо криволінійну ділянку заготовлі в деяку площину і зробимо припущення:

– оскільки зусилля витяжки зростає лише на початок локалізації стоншування в небезпечному перерізі, можна вважати товщину згинального елемента постійною, тобто. $s_x = s_1 = s_2 = s$;

– руйнування по стінці, ближче до дна склянки, відбувається при напрузі рівному напрузі руйнування плоского зразка; деформація вигину в порівнянні з деформацією розтягування незначна, її впливом на σ_v нехтуємо, проте вплив наклепу за рахунок витяжки слід врахувати;

– напруга тертя на згині пуансона приймаємо свідомо достатнім для того, щоб небезпечний перетин перемістився від 3-3 до 2-2.

Об'єм елемента, що згинається:

$$V_{зг,е} = \pi R_{сп} s \pi \left(r_{н} + \frac{s}{2} \right), \quad (31)$$

де

$$R_{сп} = (R_{вн} - r_{н}) + \left(r_{н} + \frac{s}{2} \right) \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (32)$$

Об'єм випрямленої ділянки:

$$V_{випр,е} = \pi [R_x^2 - (R_{вн} - r_{н})^2] s. \quad (33)$$

Прирівнявши обсяги $V_{зг,е} = V_{випр,е}$, отримаємо:

$$\pi R_{сп} \left(r_{н} + \frac{s}{2} \right) = R_x^2 - (R_{вн} - r_{н})^2. \quad (34)$$

Звідси

$$R_x = \sqrt{\pi R_{сп} \left(r_{н} + \frac{s}{2} \right) + (R_{вн} - r_{н})^2}. \quad (35)$$

Відомо [11], що аналогічно формулі (25)

$$\Sigma_{\text{вн}} = \sigma_{\text{вн}} + B(\epsilon)^{n-1}, \quad (36)$$

а ступінь деформації можна подати у вигляді

$$\epsilon = \left[\frac{R_x - \left(R_{\text{вн}} + \frac{s}{2} \right)}{R_x} \right] 100. \quad (37)$$

Підставивши формулу (37) формулу (36), отримаємо значення тимчасового опору наклепаного металу при операції витяжки з граничним коефіцієнтом витяжки.

Вираз (30) можна привести до зручного для вирішення вигляду

$$K_{\text{г.д}} = \frac{D_{\text{сх}}}{D_{\text{ф}}} = \frac{1}{1 - 0,01 \left\{ \frac{\sigma_{\text{т.0}}}{A} \left[\frac{\sigma_{\text{в.н}} - \frac{Q_{\text{пр}} f_{\text{тр}}}{\pi(R_{\text{и}} + r_{\text{м}})s} - \frac{\pi r_{\text{м}}}{2s} \right]}{\sigma_{\text{пл.0}} \left(\beta \ln \frac{D_{\text{ф}}}{D_{\text{и}}} + \frac{s}{2r_{\text{м}} + s} \right)} - 1 \right\}^{\frac{1}{n1}}}, \quad (38)$$

де $D_{\text{сх}} = D_3$ – діаметр заготівлі;

$D_{\text{ф}}$ – діаметр фланця, що утворився внаслідок неповної витяжки до розриву циліндричного стаканчика;

$\sigma_{\text{пл.0}}$ – напруга плинності у вихідному стані, що не деформується;

$\sigma_{\text{в.н}}$ – тимчасовий опір за ступенем сумарної деформації;

$A, n1$ – константи, що характеризують інтенсивність зміцнення матеріалу у процесі деформування.

Рівняння (30) та (38) встановлюють взаємозв'язок між характеристиками матеріалу, геометрією інструменту, тертям та граничною деформацією до руйнування виробу.

Розв'язавши рівняння (38), отримаємо коефіцієнт граничної деформації. Вираз (38) є трансцен-

дентним рівнянням (рівнянням, що не є алгебраїчним) щодо аналізованого показника штампування $K_{\text{г.д}}$. Це рівняння не вирішується явно у елементарних функціях щодо $\frac{D_{\text{сх}}}{D_{\text{ф}}}$. З необхідним ступенем точності його можна вирішити шляхом послідовних наближень.

Для визначення інтервалів значень $K_{\text{г.д}}$, відповідним категоріям витяжки сталі за ГОСТ 9045-93 (ГОСТ 9045-93 Прокат тонколистовий холоднокатаний з низьковуглецевої якісної сталі для холодної штампування. Технічні умови), були взяті серії масивів по 20 зразків у кожній категорії витяжки. Помилка визначень $K_{\text{г.д}}$ за такими масивами не перевищувала 0,00172. При обробці не менше п'яти масивів на кожен групу витяжки та товщину листа перекриття значень $K_{\text{г.д}}$ не було виявлено. Методом планування експериментів кількість варіантів (категорія витяжки – товщина) було зменшено до 12. Таким чином було отримано інтервали $K_{\text{г.д}}$ кожної категорії витяжки, наведені у таблиці 1.

Критерій $K_{\text{п.д}}$, який може бути отриманий експериментально, у разі, коли всі умови дотримані, крім якогось одного, наприклад властивості матеріалу для виду мастила, що застосовується, може з'явитися показником, що оцінює змінну характеристику в порівнянні з відомою. Якщо рівняння (29), (30) і (38) можна використовувати для інженерних розрахунків, то рівняння (29) наочно показує вплив штампування різних чинників. Достовірність розрахунків за вищезазначеними формулами підтверджується прикладом фактичних рішень за допомогою формули (38).

Дані на рішення зведені у таблиці 2.

Як випробуваний матеріал були взяті сталь 08Ю і сталь підвищеної міцності 08ГСЮТ тов-

Таблиця 1

Залежність коефіцієнта граничної деформації від товщини та категорії витяжки листа

s, мм	Інтервали значень для категорій витяжки			
	ДГ	СВ	ОСВ	ДОСВ
0,5	1,003...1,007	1,008...1,022	1,123...1,038	1,039...1,061
0,6	1,013...1,017	1,018...1,032	1,033...1,057	1,058...1,070
0,7	1,020...1,030	1,031...1,049	1,050...1,087	1,088...1,100
0,8	1,035...1,045	1,046...1,074	1,075...1,105	1,106...1,136
0,9	1,055...1,065	1,066...1,094	1,095...1,125	1,126...1,174
1,0	1,065...1,095	1,096...1,124	1,125...1,135	1,136...1,184
1,1	1,085...1,105	1,106...1,134	1,135...1,155	1,156...1,194
1,2	1,095...1,115	1,116...1,148	1,149...1,171	1,172...1,204
1,3	1,105...1,125	1,126...1,160	1,161...1,189	1,190...1,210
1,4	1,115...1,135	1,136...1,175	1,176...1,204	1,205...1,225
1,5	1,127...1,147	1,148...1,188	1,189...1,211	1,212...1,228
1,6	1,137...1,163	1,164...1,196	1,197...1,223	1,224...1,236

Примітка: ДГ – дуже глибока витяжка; СВ – складна витяжка; ОСВ – особливо складна витяжка; ДОСВ – дуже особливо складна витяжка.

Таблиця 2

Дані для розрахунку коефіцієнта граничної деформації $K_{г.д.}$ за емпіричною формулою (38)

Данні до розрахунку	Марка сталі	
	08Ю (ОСВ)	08ГСЮТ
$\sigma_{пл}$, МПа	195	300
σ_B , МПа	342	455
$\sigma_{Bн}$, МПа	443	572
A	39	71
n1	0,583	0,143
B	8,00	13,46
n'1	0,937	0,800
$Q_{пр}$, Н	13600	13600
$F_{тр}$	0,15	0,15
$\tau_{тр}$, МПа	15	17
$D_{ц}$, мм	59,0	59,0
s, мм	1,0	1,0
r_m , мм	8,0	8,0
$D_{ф}$, мм	104,1	107,0
Мастило, що застосовується	I-50	I-50

Примітка: Емпірична формула – математичне рівняння, отримане досвідченим шляхом, методом проб і помилок або як наближена формула з експериментальних даних.

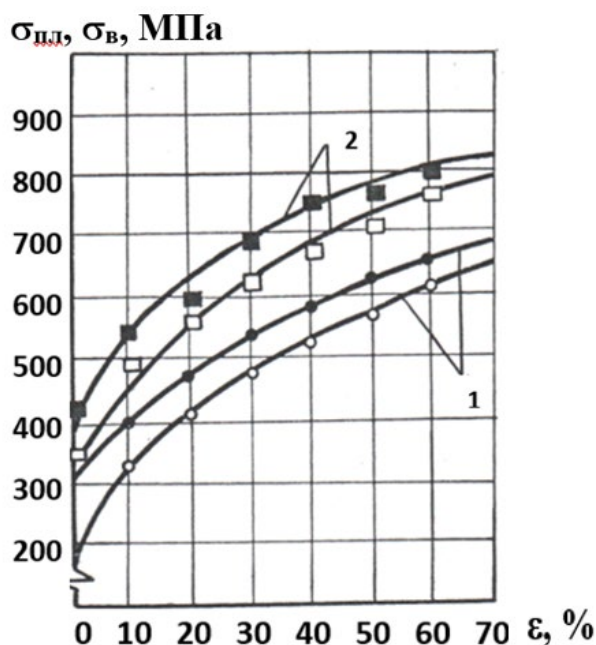


Рис. 3. Залежність міцності сталей від ступеня деформації

○ □ – $\sigma_{пл}$; ● ■ – σ_B ; 1 – сталь 08Ю; 2 – сталь 08ГСЮТ

щиною 1,0 мм. У дослідженні використовувалося мастило I-50. Постійні коефіцієнти рівнянь (27) та (36) – A, B, n1 та n'1 за методиками апроксимації кривих зміцнення металів [3, с. 80; 8, с. 60] за дійсними кривими зміцнення для цих сталей (рис. 3).

Ступінь деформації для визначення тимчасового опору наклепаного металу за формулою (36) обчислювалася за формулою (37) і дорівнює 15%, тоді для сталі 08Ю

$$\sigma_{вн} = \sigma_{в0} + B(\epsilon)^{n'1} = 342 + 8 \cdot 15^{0,937} = 443 \text{ МПа},$$

а для сталі 08ГСЮТ

$$\sigma_{вн} = \sigma_{в0} + B(\epsilon)^{n'1} = 455 + 13,46 \cdot 15^{0,8} = 572 \text{ МПа}.$$

Для сталі 08Ю за формулою (38) $K_{г.д.} = 1,095$, для сталі 08ГСЮТ – $K_{г.д.} = 1,064$.

Експериментально отримані значення $K_{г.д.} = \frac{D_{ц}}{D_{ф}}$ [5, с.12] склали: для сталі 08Ю – 1,104, для сталі 08ГСЮТ – 1,075.

При зменшенні зусилля притиску ($Q_{пр}$), коефіцієнта тертя ($f_{тр}$) та напруги тертя ($\tau_{тр}$), зі зростанням товщини листа (s) та радіуса (r_m) збільшується штампування металу, чому відповідає зростання значень $K_{г.д.}$.

Це послужило обґрунтуванням використання $K_{г.д.}$ в наших експериментах як критерій штампування для операцій глибокої витяжки.

Визначення $K_{г.д.}$ розрахунковим шляхом кожної конкретної партії сталі пов'язані з певними труднощами, оскільки до виконання розрахунків за такою формулою (38) необхідно знати величини меж текучості і міцності по діаграмам зміцнення. Побудова таких діаграм нині проводиться у разі досвідченим даним і дуже трудомістко. У той же час, визначити $K_{г.д.}$ експериментально в результаті технологічної проби на випробувальних машинах досить просто.

Тому за допомогою $K_{г.д.}$ можна отримувати експресну та надійну оцінку витяжних властивостей тонколистових сталей у виробничих умовах.

З метою оптимального діаметру заготовки для випробування штампування по $K_{г.д.}$ необхідно вибрати деякі стандартні розміри, що задовольняють широкому діапазону товщин, що випробовуються стосовно конкретної випробувальної машини. Відомо, що чим ближче габарити зразка до реальної деталі, тим більше буде досягнуто ступеня подібності. З цієї точки зору допустиме застосування пуансона діаметром 30 мм, але явно кращий результат буде отриманий при пуансоні діаметром 50 мм або навіть 100 мм. Виходячи з наявного випробувального обладнання, ми зупинилися на діаметрі 50 мм пуансона.

Визначення оптимального діаметру заготівлі проведемо для середньої з усього діапазону вимірюваних товщин – товщини 1,0 мм.

Випробування має відповідати таким вимогам: – метал повинен штампуватися з розривом за умови будь-якої, в тому числі, і максимально високої якості;

– мастило при штампуванні має бути найбільш доступним і єдиним для всіх випадків.

Для металу, що має максимально можливі пластичні властивості, $\sigma_t/\sigma_b = 0,55$, при змашуванні веретенною олією $f_{тр} = 0,15$ і $\tau_{тр} = 10$ МПа при $p = 50$ МПа. При цьому виходить гранична витяжка за формулою (22), що дорівнює $K_{г.д. гран} = 2,3$. Ці умови відповідають можливості штампування з урвищем дна при використанні будь-якого за властивостями металу завтовшки 1,0 мм.

Практичний діапазон випробувань охоплює товщину від 0,7 до 1,6 мм. Значення граничного коефіцієнта граничної деформації для товщини, що дорівнює 0,5 мм, свідомо нижче, ніж 2,3. Тому граничний діаметр заготовки, обраної для товщини, що дорівнює 1,0 мм, можна зберегти для всіх менших товщин, так як при цьому у всіх випадках відбуватиметься обрив заготовки, хоча точність методу при цьому дещо впаде.

При більших товщинах бажано мати більший діаметр заготовки (при $s = 1,6$ мм, $K_{г.д.} \approx 2,75$ і $D_{сх}$ буде дорівнює 137,5 мм). Однак при практичній роботі з реальними сталями, як показує досвід, такої зміни вихідного діаметру заготовки не потрібно і з метою уніфікації, і для цих товщин, доцільно виготовляти діаметр вихідної заготовки ($D_{сх} = D_3$) і вирубного штампу, рівним 115 мм.

Переходячи до можливих випадків застосування пуансонів та матриць з іншими розмірами, слід вибрати умови подібності.

Очевидно, задаючись тією ж товщиною, що дорівнює 1,0 мм при інших геометричних розмірах пуансона, необхідно підібрати вихідний діаметр ($D_{сх}$) заготовки таким, щоб руйнування відбувалося при $D_{сх}/D_\phi = 2,19$. Отриманий таким чином діаметр заготовки слід, як і попередньому розрахунку, збільшити на 5%.

Незважаючи на використання методу подібності при використанні пуансонів інших діаметрів, теоретична та експериментальна перевірка використаного методу показала його велику надійність, близьку відповідність умовам реаль-

ного штампування, експресність порівняно з відомими.

Була проведена статистична обробка кількості вимірювань діаметра фланця (D_ϕ) після проведення випробувань на штампування.

Порівнювалися показники точності вимірювального інструменту при $n = 30$ вимірах і при $n = 4$ «хрест на хрест» вимірах (два рази в найширшому місці фланця, що вийшов, і два рази у найвужчому, рис. 2 [5, с.12]). Експерименти проводилися з 4-ма заготовками з різного за властивостями листового матеріалу завтовшки 0,8 мм (табл. 3).

Знаходилося середнє арифметичне характеристики, а саме діаметра фланця D_ϕ , при 30 і 4 («хрест на хрест») вимірювання за формулою:

$$D_\phi = \frac{\sum_{i=1}^n D_{\phi_i}}{n}, \quad (39)$$

де n – число випробувань (вимірювань).

Визначали стандартне відхилення S , що характеризує абсолютне значення мінливості характеристики, чим вона менша, тим точніше згруповані змінні значення навколо середнього арифметичного і тим краще, точніше, середнє арифметичне характеризує варіаційний ряд:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{\phi_i} - \bar{D}_\phi)^2}{n-1}}. \quad (40)$$

Відносна варіація ознаки характеризувалася коефіцієнтом варіації:

$$v = \frac{S}{D_\phi} \cdot 100\%. \quad (41)$$

Знаходили середню помилку середнього арифметичного, яка показує, наскільки середнє арифметичне, отримане шляхом вимірювання певної частини сукупності, відхиляється від середньої, яка б вийшла при вимірі всіх одиниць сукупності:

$$m_{\bar{D}_\phi} = \xi \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (42)$$

де $\xi = 1$ для ймовірності 0,68.

Таблиця 3

Статистичний аналіз точності кількості вимірів діаметра фланця

Марка сталі	Середня арифметична характеристика, $\bar{x}$		Стандартне відхилення, S		Середня помилка середнього арифметичного, $m_{\bar{x}}$		Коефіцієнт варіації, v , %		Коефіцієнт варіації, P_a	
	для 30 вимірів	для 4 вимірів	для 30 вимірів	для 4 вимірів	для 30 вимірів	для 4 вимірів	для 30 вимірів	для 4 вимірів	для 30 вимірів	для 4 вимірів
08Ю (1)	94,35	94,13	1,470	2,40	0,268	1,20	1,600	2,50	0,284	1,27
08ГСЮТ	105,22	104,95	0,850	1,35	0,155	0,68	0,810	1,28	0,147	0,65
08Ю (2)	93,90	93,78	1,470	2,20	0,268	1,12	1,570	2,38	0,285	1,19
08ГСЮФ	103,59	103,45	0,988	1,50	0,180	0,75	0,954	1,46	0,174	0,72

Знаючи середню та її помилку можна судити про ступінь надійності результатів випробувань (вимірювань). Для цього визначали показник точності:

$$p_u = \frac{m_{D_\phi}}{D_\phi} \cdot 100\% = \frac{v}{\sqrt{n-1}} \cdot 100\%. \quad (43)$$

Результати наведеної статистичної обробки за наведеними вище формулами показує, що при 30 вимірах фланця, $n = 30$, показник точності інструменту $p_{u,cr}$ дорівнює 0,223%, а при чотирьох вимірах, $n = 4$, («хрест на хрест») $p_{u,cr}$ становить 0,958%, тобто. надійність результатів вимірювання при $n = 30$ вище, ніж при $n = 4$, проте при $n = 4$ цей показник суттєво менший за 5%, що забезпечує достатню надійність виміру отриманого фланця «хрест на хрест». Тому для визначення $K_{гд}$ рекомендується обмежитися чотирма вимірами.

Висновки. Експериментальні значення відношення в момент розриву можна оцінювати як здатність матеріалу до витяжки, що характеризується в рівнянні (22), а потім приведену до зручного для вирішення виду (38). Таким чином, гранична деформація моделі в порівняльних випробуваннях дозволяє оцінити як пластичні властивості, так і сумарну дію умов тертя, що виникають у різних режимах і граничною деформацією до руйнування виробу. Тим самим, штампування моделі, в даному випадку циліндричного стаканчика, до моменту розриву, може бути використане як основа методу оцінки листового металу, що штампується. Проведено статистичну обробку кількості вимірювань діаметра фланця (D_ϕ) після проведення випробувань на штампування. При визначенні $K_{гд}$ рекомендується обмежитися чотирма вимірами.

Список літератури:

1. Рудасьов В. Б., Якубовський О. М., Головіна О. В. Сучасні тенденції застосування сталей підвищеної міцності в автомобілебудуванні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2022. Т. 33 (72), № 1. С. 12–18. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/03>
2. Kobayashi S., Oh S. I., Altan T. Metal forming and the finite-element method. New York: Oxford University Press, 1989. 377 p. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780195364576_A23604292/preview-9780195364576_A23604292.pdf
3. Hosford W. F., Caddell R. M. Metal forming: mechanics and metallurgy. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 312 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811111>
4. Banabic D. Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation. Berlin: Springer, 2010. 301 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1>
5. Рудасьов В. Б., Якубовський О. М., Головіна О. В. Зусилля притиску при штампуванні тонколистового прокату із сталей підвищеної міцності. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2023. Т. 34 (73), № 1. С. 9–17. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/02>
6. Рудасьов В. Б., Головіна О. В., Якубовський О. М., Москаленко Г. В. Аналіз умов і напруги тертя при штампуванні тонколистового прокату із сталей підвищеної міцності. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 1. С. 6–15. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/02>
7. Lange K. Handbook of metal forming. New York: McGraw-Hill, 1985. 1230 p. <https://archive.org/details/handbookofmetalf0000unse/page/n5/mode/2up>
8. Marciniak Z., Duncan J. L., Hu S. J. Mechanics of sheet metal forming. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211 p. https://dl.ojocv.gov.et/admin_/book/Mechanics%20of%20Sheet%20Metal%20Forming%2C%20Second%20Edition%20%28%20PDFDrive%20%29.pdf
9. Hill R. The mathematical theory of plasticity. Oxford: Oxford University Press, 1950. 347 p. <https://ia801502.us.archive.org/4/items/in.ernet.dli.2015.84513/2015.84513.The-Mathematical-Theory-Of-Plasticity.pdf>
10. Davis J. R. Tensile testing. Materials Park: ASM International, 2004. 456 p. <https://ru.scribd.com/doc/97640160/Tensile-Testing>
11. Dieter G. E. Mechanical metallurgy. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1986. 751 p. https://www.academia.edu/62191867/Mechanical_Metallurgy_George_E_Dieter

Rudasov V.B., Holovina O.V., Yakubovskiy O.M. STRESS-STRAIN STATE DURING THE STAMPING OF THIN-GAUGE STEELS FOR AUTOMOTIVE COMPONENTS AND ITS RELATIONSHIP TO MATERIAL PROPERTIES

The paper presents a model of the sheet metal deep drawing process of thin sheet steel used for manufacturing automotive parts. The model allows investigation of the stress–strain state during forming, its relationship with material properties, and calculation of the drawing force and limiting drawing ratio under given material properties and friction conditions.

The study considers high-strength low-alloy steels and 08Yu steel. A comparison of properties before and after deformation is carried out. Special attention is paid to identifying deformation zones in a cylindrical element: plastic deformation, bending, elastic deformation, and fracture zones. For each zone, the stress state and its effect on the overall drawing force are determined.

The model accounts for normal and tangential stresses in the flange, friction in the flange and at the die radius, bending of the blank, and strain hardening during deformation. Plasticity hypotheses, including the maximum shear stress theory and the energy theory, are applied to describe the transition of the material into the plastic state.

The formability of sheet steel is evaluated using a limiting strain coefficient, determined analytically and verified experimentally. The results show good agreement with the real forming process and confirm the reliability of the model. A statistical analysis of flange diameter (D_f) measurements after forming tests is also performed.

The study demonstrates the influence of material properties, tool design, blank holder force, and friction conditions on drawability, which is important for optimizing forming processes of automotive parts made of high-strength steels.

Keywords: stress–strain state, material properties, drawing force, limiting drawing ratio, limiting strain coefficient.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 656.7.086

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/04>

Стратонов В.М.

<https://orcid.org/0000-0002-7366-4137>

Українська державна льотна академія

ПРОБЛЕМИ МІЖСУБ'ЄКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ У СИСТЕМІ «ПІЛОТ-ДИСПЕТЧЕР-РЯТУВАЛЬНИК» ПІД ЧАС ПОЖЕЖ НА ПОВІТРЯНИХ СУДНАХ

Метою статті є аналіз випадків пожеж на повітряних суднах (ПС) та виявлення закономірностей щодо проблем координації і комунікації між льотним екіпажем, диспетчером служби управління повітряним рухом (УПР) та службою аварійно-рятувального і протипожежного забезпечення (АРПЗП). Дослідження спирається на аналіз звітів про розслідування авіаційних подій (АП), пов'язаних із пожежами на борту, а також на звіти міжнародних авіаційних організацій щодо статистичних даних. Під час дослідження застосовувався метод синтезу емпіричних даних для оцінки ефективності алгоритмів спільної діяльності учасників авіаційно-транспортної системи під час надзвичайних ситуацій (НС).

Встановлено, що незважаючи на загальне зниження кількості АП, інциденти, в яких є загиблі, все ще залишаються суттєвою проблемою, а значна частина АП відбувається під час польоту. Доведено, що стандартний алгоритм взаємодії «пілот-диспетчер-рятувальник» є вкрай вразливим до відмов техніки та проблем, що пов'язані з людським фактором. Аналіз деяких катастроф свідчить, що навіть за умов успішної посадки ПС, відсутність чіткої комунікації та координації у перші хвилини призводить до трагічних наслідків. Задимлення салону та кабіни ПС, використання кисневих масок та паніка часто негативно впливають на ланцюг передачі інформації через диспетчера, який виступає центральним комунікаційним вузлом. Доведено, що існуюча лінійна схема передачі інформації створює значні затримки, які під час пожеж вимірюються людськими життями. Обґрунтовано необхідність зміщення наукового фокусу з суто технічних аспектів на системну інтеграцію алгоритмів реагування та покращення міжсуб'єктної взаємодії.

Запропоновано на законодавчому та технічному рівнях розглянути можливість обов'язкового впровадження систем прямого аварійного зв'язку, що дозволить командир пожежного розрахунку спілкуватися безпосередньо з командиром ПС. Окрім цього рекомендовано здійснювати спільні міжвідомчі тренування з урахуванням реальних комунікаційних проблем, а також використовувати системи штучного інтелекту чи багатокритеріальний підхід для підтримки прийняття рішень щодо вибору оптимального місця посадки.

Ключові слова: пошук та рятування, пожежа, авіаційна подія, міжсуб'єктна взаємодія, спільні рішення.

Постановка проблеми. Сучасний технологічний рівень за останні десятиліття дозволив значно знизити ризики виникнення АП у цивільній авіації (ЦА). Окрім удосконалення безпекової складової авіаційної техніки, Міжнародна організація ЦА (ІКАО) у співробітництві з національними регулюючими органами з питань ЦА постійно напружують та реалізують на законодавчому рівні нормативно-правові акти, які мають на меті попередження АП.

Але незважаючи на це, ми постійно є свідками АП різного ступеня тяжкості: від інцидентів до катастроф. Це у першу чергу є наслідком тих факторів, вплинути на які досить проблематично (людський фактор), або ж факторів, що породжені відсутністю дієвих алгоритмів щодо спільної діяльності учасників авіаційно-транспортної системи під час різних за природою НС. Аспекти міжсуб'єктної взаємодії у роботі розглядаються у контексті безпеки польотів при пожежах на борту ПС під час польоту.

© Стратонов В.М., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблема забезпечення безпеки польотів в умовах виникнення пожежі на борту ПС залишається одним із найбільших викликів для сучасної ЦА. У роботі Чжан Ц. (Q. Zhang) [1] пропонується концепція «розумного вантажного контейнеру», що полягає в ізолюванні процесу пожежогасіння всередині кожного контейнеру, запобігаючи таким чином розповсюдження вогню по ПС. Поєднання алгоритмів комп'ютерного зору, технології радіочастотної ідентифікації та камер інфрачервоного діапазону задля раннього виявлення пожеж досліджено у роботі Ван К. (K. Wang) [2]. Ще ряд праць за останній період присвяченні проблемі самозаймань літій-іонних батарей під час їх транспортування авіатранспортом.

Однак, загалом, аналіз наукових досліджень останніх років демонструє зміщення фокусу із суто технічних аспектів, як то проблем вогнестійкості матеріалів, на дослідження питань людського фактора, стресостійкості екіпажів та міжсуб'єктної взаємодії.

Вітчизняні науковці (Т. Шмельова, Ю. Сікірда, М. Яцко, В. Смоланка, О. Сечко, Ю. Серостанов, М. Жарікова) активно досліджують механізми спільного прийняття рішень в умовах аварійних ситуацій. До прикладу, деякі аспекти людського фактору (діагностування емоційного стану людини-оператора й оптимізація процесу надання екстренної медичної допомоги) розглядались у роботі [3], та у роботі [4], яка була присвячена впровадженню інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень на основі багатокритеріальних стохастичних моделей, що дозволяє оптимізувати дії екіпажу у разі проблем зі здоров'ям командира ПС. Зокрема у роботі [5] з застосуванням детерміністичних, стохастичних та нестохастичних моделей опрацьовувалась можливість отримання оптимального спільного рішення (аварійна ситуація (АС), що пов'язана з підбором оптимального місця приводнення ПС після зіткнення з хмарою вулканічного попелу), тоді як у [6] розглядався процес прийняття рішень екіпажем ПС у випадку розгерметизації.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз випадків пожеж на ПС й виявлення закономірностей щодо проблем координації та комунікації між льотним екіпажем, диспетчером УПР та службою АРПЗП.

Виклад основного матеріалу. Провівши аналіз АС за останні роки, було встановлено, що до прикладу 2023 рік був найбезпечнішим за останні п'ять років з точки зору таких показників, як «кіль-

кість АС із загиблими» та «загальна кількість загиблих під час АС». Якщо ж зупинятися на проблемі АС, що пов'язані з пожежами на ПС, то за 2023 рік було зафіксовано всього лише 1 випадок (Boeing 737-9 Max, 09.30.2023) пожежі на борту ПС, під час якого не було зафіксовано загиблих чи постраждалих, а фюзеляж ПС зазнав лиш незначних пошкоджень.

У наступному 2024 році авіаційна галузь за даними Міжнародної асоціації повітряного транспорту (IATA) продемонструвала не менш високий рівень безпеки, покращивши п'ятирічні середні показники за кількома ключовими параметрами. Водночас, у порівнянні з 2023 роком, спостерігалось деяке «погіршення» статистики АС. Так у 2024 році було зафіксовано сім АП із летальними наслідками (загалом проаналізовано 40,6 мільйона польотів).

Під час даних авіакатастроф кількість загиблих сягнула 244 осіб, що значно перевищує відповідний показник 2023 року (72 загиблих) та п'ятирічний середній рівень (144 загиблих). У 2024 році найчастіше траплялися АП, що пов'язані з викочуванням ПС за межі злітно-посадкової смуги (ЗПС). Згідно з інтерактивним звітом про безпеку IATA [7], який дає змогу відфільтрувати АП за типом та періодом спостереження, у період з 2015 по 2024 роки було зафіксовано 40 АП, що пов'язані з пошкодженням ПС під час польоту (In-flight Damage), з них 2 події, причиною яких була пожежа на борту [8].

Наведену статистику підтверджує й звіт щодо безпеки польотів Airbus за 1958-2024 роки [9]. Незважаючи на беззаперечну тенденцію щодо зниження кількості випадків АС, кількість аварій та катастроф, що відбулись на етапі польоту по маршруту та на етапі зльоту ПС залишається суттєвою (рис. 1).

У даному звіті додатково виокремлено причини, що призвели до АС. Так за період 2004 по 2024 роки причиною, що призвела до найбільшої кількості АС є втрата контролю над управлінням ПС у польоті - 34% від усіх АП, що супроводжувались загибеллю пасажирів та членів екіпажу. Серед інших причин, що найчастіше призводили як до загибелі людей, так і до суттєвих пошкоджень авіатехніки відносять здійснення вимушених контрольованих посадок в непристосованих умовах та викочування ПС за межі ЗПС. Пожежі є причиною приблизно 3% від усіх АП за вказаний час спостереження.

Особливості розвитку пожеж на ПС. Пожежа на борту ПС під час польоту, як першо-

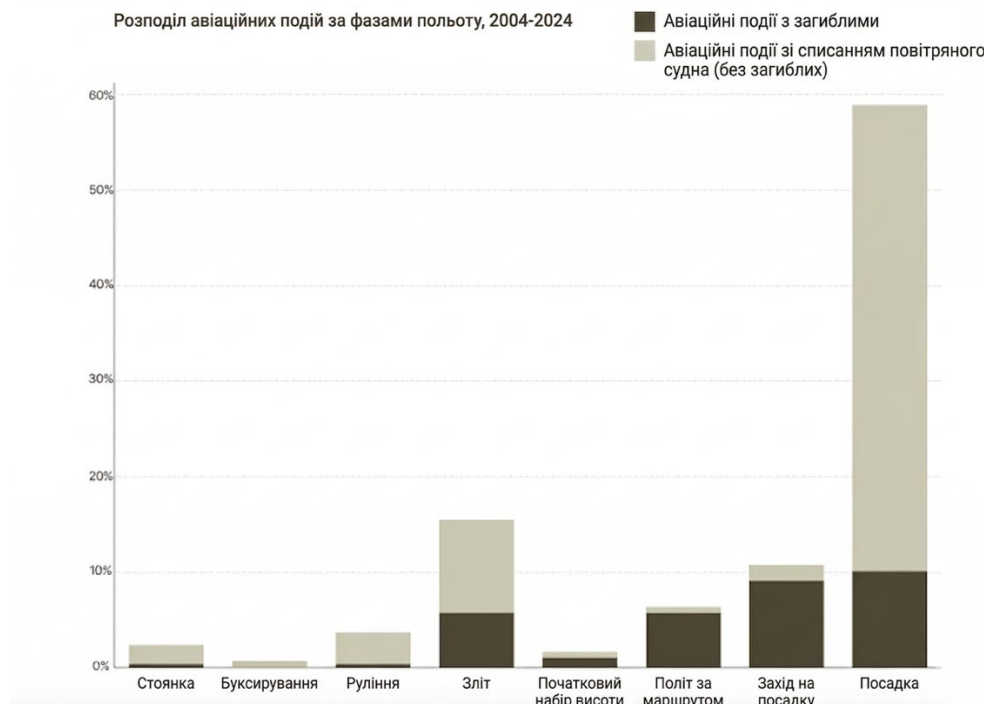


Рис. 1. Розподіл авіаційних подій за фазою польоту у 2004-2024 роках

причина АП, не є основною протягом останніх десятиліть. Однак за своєю специфікою є однією з найнебезпечніших явищ, що можуть виникнути під час польоту. Зокрема, у разі пожежі під час польоту у екіпажу ПС є приблизно 17 хвилин для того, щоб здійснити посадку, інакше ПС опиниться у неконтрольованому стані [10]. У цивільній авіації тип пожежі на ПС визначають відповідно до місця її виникнення: кабіни, салону, вантажного відділення, двигунів, електромережі. За останні роки з'явилися нові джерела небезпеки, які можуть стати причиною пожежі. Даними джерелами небезпеки є здебільшого електронні пристрої з літислою батареєю (електронні сигарети, павербанки, мобільні телефони, ноутбуки та ін.), які за певних режимів та умов використання можуть самозайнятися.

Пожежі двигуна(ів) зазвичай виявляються й локалізуються завдяки вбудованим системам виявлення та гасіння пожеж. Однак у деяких випадках, наприклад, при вибуховому руйнуванні турбіни, характер пожежі може перевищувати можливості стандартних систем, що може призвести до поширення вогню на крило або фюзеляж. Наявність диму на борту суттєво ускладнює видимість, що особливо критично у кабіні екіпажу. Наприклад, пожежа електромереж ПС зазвичай супроводжується густим білим димом, який може повністю закрити огляд приладів, фак-

тично позбавляючи екіпаж можливості керувати ПС. Крім того, продукти горіння зазвичай мають високий ступінь токсичності й впливають на органи дихання та зору [10].

Основними ж причинами пожеж силових установок є надмірна подача палива, технічні несправності, розриви паливопроводів, руйнування лопаток ротора та ін. Тепло, що передається від епіцентру пожежі (двигуна, що палає) через обшивку фюзеляжу нагріває внутрішні конструктивні елементи, крісла та повітря у пасажирському салоні, що призводить до значного зростання температури. Перевищення температури спричиняє втрату свідомості більшості пасажирів, що унеможливорює їхню самостійну евакуацію.

Вимушені посадки ПС з двигуном, що горить, можуть призвести до пожежі розлитого авіаційного палива (за умови, якщо екіпаж не встиг злити паливо перед приземленням). Саме тому служби АРПЗП після прибуття на місце АП повинні негайно організувати подавання повітряно-механічної піни для гасіння основних осередків пожежі, що були спричинені розлитим авіаційним паливом. В умовах інтенсивної пожежі розлитого палива вогнестійкість обшивки фюзеляжу становить від 40 до 120 секунд. Пожежі даного типу спричиняють швидке підвищення температури всередині корпусу ПС, прогорання обшивки та поширення вогню у пасажирський салон й кабіну

екіпажу, а також створюють умови для вибуху паливних баків [11].

Виникнення масштабної пожежі в пасажирському салоні та інших внутрішніх приміщеннях також є однією з найнебезпечніших ситуацій, з якою може зіткнутися екіпаж у польоті. Серед особливостей варто відмітити те, що даний тип пожеж здатний викликати паніку серед пасажирів, які інстинктивно переміщуватимуться у протилежну від місця загоряння частину ПС, що призводить до порушення центрування й ускладнює керування ПС. Ще одна особливість пожеж даного типу полягає у тому, що її початковий етап розвитку може відбуватися у недоступних для екіпажу зонах (наприклад, над стелею кабіни), де відсутній прямий доступ для подачі вогнегасної речовини [12].

Аналіз випадків пожеж на ПС. Як відомо, стандартний алгоритм дій льотного екіпажу у разі виникнення пожежі має три послідовні кроки: «Aviate-Navigate-Communicate» (керуй-орієнтуйся-комунікуй). Першочерговим завданням екіпажу є збереження управління над ПС та виконання аварійних чек-листів: перекриття паливних магістралей, приведення у дію бортових систем пожежогасіння. Тільки після цього екіпаж ініціює комунікацію, оголошуючи надзвичайну ситуацію (MAYDAY або PAN-PAN) та передає інформацію щодо пожежі диспетчеру УПР.

У цій схемі диспетчер УПР виступає центральним комунікаційним вузлом. Для забезпечення своєчасного реагування на АС підрозділами АРПЗП, диспетчер повинен з'ясувати та передати рятувальникам інформацію щодо типу ПС, орієнтовного часу посадки, інформацію про залишок палива, наявність небезпечних вантажів, кількість людей на борту та інформацію про виділену для позачергової посадки ЗПС. Згідно зі стандартами ІКАО, час розгортання АРПЗП від моменту оголошення тривоги до моменту прибуття перших підрозділів рятувальної служби до місця, де буде проводитись пожежогасіння не повинно перевищувати 3 хвилини. Проте зазначений алгоритм взаємодії «пілот-диспетчер-рятувальник» є достатньо вразливий до відмов техніки, проблем комунікації, та інших недоліків, що пов'язані з людським фактором. АП, що проаналізовані нижче, тільки підтверджують дане твердження.

Першим випадком АП, що наводиться у аналізі є катастрофа рейсу **Saudia Flight 163 (1980 рік)** у Саудівській Аравії. Після отримання сигналу про пожежу у багажному відділенні екіпаж Lockheed L-1011 зумів повернутися в аеропорт

вильоту і здійснити успішну посадку. Диспетчер УПР своєчасно підготував підрозділи АРПЗП, які очікували екстреного гальмування ПС на початку ЗПС. Проте екіпаж не здійснив аварійної зупинки й ПС прокотилося всією ЗПС, а потім і руліжною доріжкою, змусивши рятувальні засоби переслідувати ПС. Найгіршим виявилось те, що після зупинки пілоти понад три хвилини не вимикали двигуни. Рятувальники фізично не могли наблизитися до фюзеляжу через небезпеку затягування у турбіну. Водночас усередині ПС виникли серйозні проблеми з організацією процесу евакуації: командир ПС через паніку та дезорганізацію не зумів організувати своєчасне покидання салону пасажирами та екіпажем. Надалі пожежа посилювалась й усі хто перебував на борту ПС загинули від вогню та отруєння чадним газом [13].

Інколи, вдалі обставини, що склалися на початку АС можуть бути знівельовані недостатньою комунікацією у трикутнику «пілот-диспетчер-рятувальник», як це сталося під час катастрофи **British Airtours Flight 328 (28M) (1985 рік)** у Манчестері. Після руйнування двигуна унаслідок пожежі під час розбігу ПС, екіпаж Boeing 737 ухвалив рішення про відміну зльоту. Диспетчер вчасно помітив полум'я й проінформував службу АРПЗП. Однак льотний екіпаж, не володіючи інформацією про силу та напрям вітру на ЗПС, ухвалив рішення звернути на руліжну доріжку. Цей маневр розвернув ПС так, що вітер поніс полум'я безпосередньо на хвостову частину фюзеляжу, створюючи ефект паяльної лампи. Проблема комунікації полягала у тому, що диспетчер мав обмежені можливості щодо надання порад екіпажу про позиціонування ПС відносно вітру. Швидке поширення вогню та хаос під час евакуації призвели до загибелі 55 осіб [14].

Катастрофа **Swissair Flight 111 (1998 рік)** над Атлантикою стала наглядним прикладом втрати дорогоцінного часу через порушення термінології. У даному випадку екіпаж відчувши запах диму спочатку передав сигнал PAN-PAN, вважаючи, що запах диму був визваний несправністю кондиціонера (насправді ж відбулось коротке замикання у енергетичній системі ПС). Відтак, диспетчер не усвідомив масштабів загрози, і замість екстреного зниження між пілотом та «землею» почались обговорення щодо скидання палива над океаном. Відсутність вчасних вказівок з боку органу УПР призвела до втрати безцінних хвилин, за які пожежа перепалила системи керування літаком, що спричинило падіння в океан та загибель 229 осіб. Через раптову втрату зв'язку АРПЗП не були про-

інформовані про місце приводнення й змушені були шукати місце катастрофи фактично наосліп (хоча це місце було усього за 5 морських миль від затоки поблизу м. Пеггіс-Коув) [15].

Ще яскравіше проблему взаємодії продемонструвала катастрофа з бортом **UPS Airlines Flight 6 (2010 рік)** у Дубаї. Першопричиною авіакатастрофи стало самозаймання вантажу літій-іонних батарей, що призвело до утворення густого диму, який не дозволив пілотам переключити частоту зв'язку з бахрейнського диспетчера на диспетчера аеропорту Дубая. Комунікація здійснювалася через інші пасажирські ПС, що перебували поруч у повітрі. Орган УПР не мав повної інформації щодо ситуації на борту, тож затримки у передачі команд призвели до втрати просторової орієнтації екіпажем. Дезорієнтоване ПС здійснило вимушену посадку поза межами аеродрому у безлюдному районі, де сили та засоби АРПЗП не мали змоги вчасно надати допомогу. Унаслідок АП загинули обидва пілоти. Цей випадок демонструє важливість підтримання постійного зв'язку для координації дій спершу між пілотом та диспетчером, пізніше між диспетчером та рятувальниками (для їх спрямування до місця АП) [16].

Проблеми сумісних дій яскраво проявляються навіть тоді, коли ПС залишається на землі і здається, що АС вже майже ліквідована. Так під час АП з рейсом **American Airlines Flight 383 (2016 рік)** у Чикаго відбулося руйнування правого двигуна. Диспетчер миттєво зреагував, й перші рятувальні засоби прибули за дві хвилини до аварійного ПС. Проте всередині літака виник хаос: пілоти через паніку не заглушили лівий (неушкоджений) двигун, бортпроводники, що бачили загрозу від працюючих двигунів не змогли зв'язатися з кабіною пілотів. Внаслідок втрати зв'язку евакуація розпочалася хаотично, і пасажери вистрибували просто під реактивний струмінь працюючого лівого двигуна, отримуючи при цьому травми. АРПЗП також наражалися на смертельну небезпеку, не маючи прямого зв'язку з льотним екіпажем, щоб наказати командирі ПС заглушити двигун [17].

Висновки. Синтез емпіричних даних, отриманих у результаті аналізу АП, дозволяє зробити висновок: аспекти міжсуб'єктної взаємодії є вкрай вразливими у системі забезпечення без-

пеки польотів. Проведений аналіз причин авіакатастроф рейсів Saudia 163, American Airlines 383 свідчить про одну спільну рису - навіть якщо екіпажу вдається вдало посадити ПС, що горить, відсутність чіткої комунікації у перші хвилини АП з великою ймовірністю може призвести до трагічних наслідків.

Практика показує, що взаємодія трикутника «пілот-диспетчер-рятувальник» час від часу демонструє системні недоліки в умовах гострого стресу. У цій лінійній схемі кожна ланка вносить певну затримку, що в умовах пожеж авіаційної техніки буквально вимірюється людськими життями. Отримані результати підтверджують, що особливої уваги та трансформації підходів потребує саме координація між рятувальними службами та льотними екіпажами.

Для вирішення цієї проблеми подальші наукові дослідження мають зосередитися на кількох напрямках. Насамперед йдеться про обов'язкове глобальне впровадження систем прямого аварійного зв'язку (Direct Emergency Communication) [18]. Це дозволить командирі пожежного розрахунку спілкуватися з командиром ПС безпосередньо, минаючи ланку диспетчера УПР для узгодження шляхів евакуації, орієнтації ПС за вітром чи для наказу про зупинку працюючих двигунів.

Не менш важливим аспектом є проведення спільних міжвідомчих тренувань. Такі навчання повинні імітувати не лише відпрацювання вже відомого алгоритму (отримання сповіщення, формування необхідних сил та засобів, виїзд у задану точку та ін.), а й враховувати проблематику комунікації, яка характерна для реальних АП - відмова внутрішнього бортового зв'язку, управління пасажирями у стані паніки та ін.

Паралельно з цим необхідно мінімізувати негативний вплив людського фактора на етапі вибору оптимального місця посадки ПС. Даний аспект може бути реалізований шляхом попереднього обрахунку на основі багатокритеріального підходу, або ж через впровадження автоматизованих систем штучного інтелекту (навчені на стандартах ІКАО та досвіді й рішеннях попередніх АП), які б у недирижувальній формі надавали поради щодо прийняття рішення у ланцюгу «пілот-диспетчер-рятувальник».

Список літератури:

1. Zhang Q., Wang Y. C., Soutis C., Gresil M. Development of a fire detection and suppression system for a smart air cargo container. *The Aeronautical Journal*. 2021. Vol. 125, No. 1283. P. 205–222. DOI: <https://doi.org/10.1017/aer.2020.89>.
2. Wang K., Zhang W., Song X. A Fire Detection Method for Aircraft Cargo Compartments Utilizing Radio Frequency Identification Technology and an Improved YOLO Model. *Electronics*. 2025. Vol. 14, No. 1. Art. 106. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14010106>.

3. Shmelova T., Smolanka V., Sikirda Y., Sechko O. Real-time monitoring and diagnostics of the person's emotional state and decision-making in extreme situations for healthcare. *Decision Making and Analysis*. 2024. P. 11–32. DOI: <https://doi.org/10.55976/dma.22024121911-32>.
4. Shmelova T., Yatsko M., Sierostanov I. Collaborative Decision Making (CDM) in Emergency Caused by Captain Incapacitation: Deterministic and Stochastic Modelling. *International Journal of Decision Support System Technology*. 2023. Vol. 15, No. 1. P. 1–27. <https://doi.org/10.4018/IJDSST.320477>
5. Shmelova T., Sikirda Y., Yatsko M., Stratonov V. Integration of Deterministic, Stochastic, and Non-stochastic Models to Obtain an Optimal Collaborative Decision in the Flight Emergency. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Advances in Civil Aviation Systems Development*. Cham : Springer, 2024. P. 205–223. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-60196-5_17.
6. Shmelova T., Chialastri A., Yatsko M., Sikirda Y., Zharikova M. Decision-Making Models by the Aircraft Crew in Emergency “Depressurization”. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Computational & Information Technologies for Risk-Informed Systems (CITRisk 2022)*. Aachen : CEUR-WS.org, 2023. Vol. 3422. P. 132–145. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3422/Paper12.pdf>.
7. Interactive Safety Report / International Air Transport Association. URL: <https://www.iata.org/en/publications/safety-report/interactive-safety-report/> (дата звернення: 22.03.2026).
8. IATA Releases 2024 Safety Report / International Air Transport Association. 2025. URL: <https://www.iata.org/en/pressroom/2025-releases/2025-02-26-01/> (дата звернення: 22.03.2026).
9. A Statistical Analysis of Commercial Aviation Accidents / Airbus. 2025. URL: https://accidentstats.airbus.com/wp-content/uploads/2025/02/20241325_A-Statistical-analysis-of-commercial-aviation-accidents-2025-links.pdf (дата звернення: 22.03.2026).
10. Fire in the Air / SKYbrary. URL: <https://skybrary.aero/articles/fire-air> (дата звернення: 22.03.2026).
11. Аветісян В. Г., Сенчихін Ю. М., Ораєвський Д. В. Організація аварійно-рятувальних робіт на авіаційному транспорті : навч. посіб. Харків : НУЦЗУ, 2012. 108 с.
12. Passenger Cabin Fire / SKYbrary. URL: <https://skybrary.aero/articles/passenger-cabin-fire> (дата звернення: 22.03.2026).
13. Aircraft Accident Report: Saudi Arabian Airlines, Lockheed L-1011, HZ-AHK, Riyadh, Saudi Arabia, August 19, 1980 / Presidency of Civil Aviation. Jeddah, 1982. URL: <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/AircraftAccidentReportSAA.pdf> (дата звернення: 22.03.2026).
14. Report on the accident to Boeing 737-236 series 1, G-BGJL at Manchester International Airport on 22 August 1985 : Aircraft Accident Report 8/1988 / Air Accidents Investigation Branch. London : Her Majesty's Stationery Office, 1989. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5422efe840f0b61342000277/8-1988_G-BGJL.pdf (дата звернення: 22.03.2026).
15. Aviation Investigation Report: In-Flight Fire Leading to Collision with Water, Swissair Transport Limited, McDonnell Douglas MD-11 HB-IWF, Peggy's Cove, Nova Scotia 5 nm SW, 2 September 1998 : Report Number A98H0003 / Transportation Safety Board of Canada. Gatineau, 2003. URL: <https://www.tsb.gc.ca/sites/default/files/rapports-reports/aviation/A98H0003/eng/a98h0003.pdf> (дата звернення: 22.03.2026).
16. Air Accident Investigation Report: Uncontained Cargo Fire Leading to Loss of Control Inflight and Uncontrolled Descent Into Terrain, Boeing 747-44AF, N571UP, Dubai, United Arab Emirates, 03 September 2010 / General Civil Aviation Authority of the United Arab Emirates. Abu Dhabi, 2013. URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-11/UPS6_Accident_Report.pdf (дата звернення: 22.03.2026).
17. Uncontained Engine Failure and Subsequent Fire, American Airlines Flight 383, Boeing 767-323, N345AN, Chicago, Illinois, October 28, 2016 : Aircraft Accident Report NTSB/AAR-18/01 / National Transportation Safety Board. Washington, 2018. URL: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/aar1801.pdf> (дата звернення: 22.03.2026).
18. Direct Emergency Communication / SKYbrary. URL: <https://skybrary.aero/articles/direct-emergency-communication> (дата звернення: 22.03.2026).

Stratonov V.M. PROBLEMS OF INTER-SUBJECT INTERACTION IN THE "PILOT - AIR TRAFFIC CONTROLLER - RESCUER" SYSTEM DURING AIRCRAFT FIRES

The purpose of the article is to analyze cases of aircraft (AC) fires and identify patterns regarding coordination and communication problems among the flight crew, air traffic controllers (ATC), and rescue and firefighting services (RFFS). The research is based on the analysis of aviation occurrence (AO) investigation reports related to in-flight fires, as well as statistical data reports from international aviation organizations. The study employed the method of empirical data synthesis to evaluate the effectiveness of joint activity algorithms of aviation transport system participants during emergency situations.

It has been established that despite a general decrease in the number of AOs, incidents involving fatalities still remain a significant problem, and a substantial part of AOs occur during en-route flights. It has been proven that the standard "pilot-controller-rescuer" interaction algorithm is highly vulnerable to equipment failures and issues related to human factors. The analysis of several catastrophes indicates that even in the event of a successful AC landing, the lack of clear communication and coordination in the first few minutes leads to tragic consequences. Cabin and cockpit smoke, the use of oxygen masks, and panic often negatively affect the information transmission chain through the controller, who acts as the central communication hub. It has been demonstrated that the existing linear scheme of information transmission creates significant delays, which during fires are measured in human lives. The necessity of shifting the scientific focus from purely technical aspects to the systemic integration of response algorithms and the improvement of inter-subject interaction is substantiated.

It is proposed to consider, at legislative and technical levels, the mandatory implementation of direct emergency communication systems, which will allow the fire crew commander to communicate directly with the pilot-in-command. Additionally, it is recommended to conduct joint interagency training taking into account real communication problems, as well as to use artificial intelligence systems or a multi-criteria approach for decision-making support regarding the selection of the optimal landing site.

Keywords: search and rescue, fire, aviation occurrence, inter-subject interaction, joint decisions.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Younis B.N.<https://orcid.org/0000-0002-5693-6954>

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

FINITE ELEMENT MODELLING OF LAYERED COMPOSITE PANELS FOR AEROSPACE STRUCTURES: MESH SENSITIVITY, BOUNDARY CONDITIONS, AND BUCKLING BEHAVIOUR UNDER COMBINED LOADING

Accurate finite element (FE) modelling of fibre-reinforced composite panels is a prerequisite for reliable structural certification in aerospace applications. Despite widespread adoption of finite element analysis (FEA), analysts routinely face three fundamental questions: what mesh refinement is truly sufficient, how much boundary-condition uncertainty is tolerable, and what is genuinely gained by incorporating progressive damage into a post-buckling simulation. This study addresses all three questions through a systematic, quantitatively rigorous investigation applied to representative CFRP and GFRP aerospace panel geometries.

The principal findings challenge prevailing assumptions. Boundary condition fidelity alone accounts for an 18 % spread in predicted linear buckling load between simply-supported and fully-clamped edge restraints – a variation that exceeds the combined influence of typical material property scatter. Post-buckling failure load predictions from purely elastic analyses exceeded experimental values by 28–34 %; integration of cohesive-zone delamination modelling reduced that discrepancy to 6.2 %. A six-level mesh sensitivity study established 4.0 elements/mm² with S8R shell elements as the convergence threshold, achieving accuracy within 1.2 % at approximately 25 % of the computational cost of the finest mesh evaluated.

All numerical predictions are validated against digital image correlation (DIC) measurements from panel tests conducted under combined compression and in-plane shear. Buckling load errors remained below 4.5 % and ultimate failure load errors below 6.2 % across all configurations, with a full-field strain spatial correlation coefficient $R^2 = 0.971$. The paper concludes with a validated four-step modelling protocol that practising structural analysts can apply with confidence to composite panel design tasks.

Keywords: *finite element analysis; composite laminates; mesh sensitivity; boundary conditions; buckling; post-buckling; CFRP; GFRP; progressive damage; cohesive zone; aerospace structures.*

Formulation of the problem. Fibre-reinforced polymer (FRP) composites account for more than 50 % of the structural mass of modern commercial and military aircraft. Wing covers, fuselage skin panels, empennage skins, and floor beams are routinely manufactured from carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) laminates whose load-bearing capability under compressive and shear service loads is governed primarily by buckling and post-buckling stability rather than by material strength limits [1, p. 1199]. This shift from strength-driven to stability-driven design has made high-fidelity structural analysis indispensable: errors in predicted buckling load translate directly into structural weight penalties or, worse, into non-conservative margins that compromise airworthiness certification.

The finite element method (FEM) is the universally adopted tool for composite panel stability anal-

ysis in industry and research. Yet despite decades of refinement, a recurring disconnect exists between FEA predictions and physical test outcomes at the panel level. Investigations consistently identify three categories of modelling decision as the principal sources of this discrepancy: (i) the choice of element type and mesh density; (ii) the representation of physical boundary conditions; and (iii) the presence or absence of progressive interlaminar damage modelling in the post-buckling regime [2, p. 318; 3, p. 194]. Each of these factors is routinely underestimated in industrial analysis workflows, contributing to structural margins that are either overly conservative – adding unnecessary weight – or non-conservative, creating safety risk.

The problem is compounded by the anisotropic and heterogeneous constitution of composite laminates. Unlike isotropic metals, the buckling and post-buck-

ling behaviour of composite panels is strongly coupled to laminate architecture through in-plane anisotropy, bending–extension coupling in non-symmetric layups, and progressive interlaminar crack growth driven by out-of-plane peel and shear stresses at ply interfaces. Small modelling choices – whether to include transverse shear in the shell kinematic formulation, whether to assume pinned or clamped edges, whether to insert cohesive elements at ply interfaces – produce disproportionately large differences in predicted structural performance. Quantifying these differences rigorously is both a scientific and a practical imperative.

Analysis of recent research and publications.

The numerical analysis of composite panel stability has attracted sustained research effort since the 1970s. Lekhnitskii's classical theory of anisotropic plates provided the analytical foundation [4, p. 329], and Reddy's comprehensive treatment of laminated composite plate theory established the variational and finite-element basis for modern structural simulation tools [5, p. 1]. Early FEA studies of composite panels focused primarily on linear eigenvalue buckling and were limited by the computational resources available at the time.

The development of progressive failure models transformed post-buckling analysis. Chang and Lesard [6, p. 2] introduced ply-level property degradation rules that remain in widespread industrial use. Hashin's physically motivated intralaminar failure criteria [7, p. 329] distinguished between fibre-dominated and matrix-dominated failure modes, enabling mode-specific design interpretation. The cohesive zone method, formalised for composite delamination by Camanho and Dávila [8], provided a mechanistically consistent framework for simulating progressive interlaminar crack growth. Subsequent work by Turon et al. [9, p. 1072] introduced an element-size regularisation correction that made the method practical for large structural models.

Mesh sensitivity in composite shell models has received comparatively limited systematic attention. Barbero's textbook treatment [10, p. 45] provides general guidance but without the panel-specific quantitative data that practitioners need. Bisagni and Veskovini [2, p. 320] studied mesh effects in the context of stiffened panel buckling and found significant sensitivity at coarse densities, but their work was confined to a single laminate architecture. Orifici et al. [3, p. 196] reviewed progressive failure methodologies broadly but did not isolate mesh density as a controlled variable.

The boundary condition problem has received more explicit treatment in the experimental mechan-

ics literature than in FEA methodology papers. Bisagni [11, p. 178] documented fixture-induced partial clamping in panel compression tests and showed that assumed boundary conditions introduced prediction errors exceeding 10 %. Nemeth [12, p. 3] provided analytical solutions for plates under combined loading that quantify the theoretical sensitivity to edge restraint, but without the experimental correlation needed to validate FEA models. The gap between theoretical sensitivity studies and test-correlated FEA remains largely unaddressed.

The unresolved aspects that motivate the present study are therefore: (a) the absence of panel-specific mesh convergence data spanning multiple response metrics simultaneously; (b) the lack of a quantified comparison between assumed and characterised boundary conditions in test-correlated FEA; and (c) the absence of a systematic assessment of the improvement in failure load prediction accuracy attributable solely to the addition of cohesive zone delamination modelling, with all other modelling choices held constant.

Task statement. The overarching objective of this study is to provide quantitative, panel-specific answers to the three modelling questions identified above, supported by full experimental validation. The specific research tasks are:

1. Determine the mesh density at which peak in-plane stress, first-ply-failure load, and linear buckling eigenvalue converge to within 1.5 % of the overkill solution for the panel configurations studied.
2. Quantify the sensitivity of predicted buckling load to idealised boundary condition type (pinned vs. clamped) and to measured fixture rotational stiffness applied as distributed spring boundary conditions.
3. Assess the reduction in failure load prediction error obtained by incorporating Benzeggagh–Kenane cohesive zone delamination modelling in post-buckling analysis, relative to an elastic baseline.
4. Validate all FEA predictions against full-field DIC strain measurements and load-displacement data from panel tests under combined compression and in-plane shear.

Three panel configurations are investigated: a quasi-isotropic CFRP laminate $[0/\pm 45/90]_{2s}$ (300×200 mm), a cross-ply GFRP laminate $[0/90]_{4s}$ (300×200 mm), and a stiffened CFRP panel with two co-cured J-stringers (450×300 mm). All panels are tested under combined end-shortening compression and in-plane shear representative of fuselage skin corner-panel loading conditions.

Outline of the main material of the study. Materials and FE Model Formulation. The CFRP panels

were fabricated from IM7/8552 unidirectional prepreg tape ($V_f = 0.57 \pm 0.02$). Ply mechanical properties obtained from ASTM-standardised coupon tests: $E_1 = 161$ GPa, $E_2 = 11.4$ GPa, $G_{12} = 5.17$ GPa, $\nu_{12} = 0.32$, $X_t = 2325$ MPa, $X_c = 1200$ MPa, $Y_t = 62$ MPa, $Y_c = 202$ MPa, $S_{12} = 92$ MPa [13, p. 36]. The GFRP panels used woven E-glass/epoxy fabric (600 g/m²) infused by VARI: $E_1 = E_2 = 23.5$ GPa, $G_{12} = 4.1$ GPa, $\nu_{12} = 0.14$. Interlaminar fracture toughness was measured per ASTM D5528 and D7905: $G_{Ic} = 0.28$ kJ/m², $G_{IIc} = 1.02$ kJ/m², Benzeggagh–Kenane exponent $\eta = 1.45$ [14, p. 1665].

All analyses were performed in Abaqus/Standard 2022. Eight-node reduced-integration shell elements (S8R) with Mindlin–Reissner kinematics were selected over four-node bilinear elements to avoid shear locking under bending-dominated loads at moderate mesh densities [10, p. 87]. Three Gauss points per ply through the thickness recovered ply-level stresses for failure criterion evaluation. Geometric nonlinearity (updated Lagrangian formulation) was activated throughout. Cohesive zone elements (COH3D8) with bilinear traction-separation laws governed by the B–K criterion [15, p. 439] were inserted at all ply interfaces within the central 60 % of the panel area. The model parameter summary is given in Table 1.

Table 1. Summary of FE model parameters for the three panel configurations investigated in this study.

Panel Configuration	Element Type	Mesh Density (el/mm ²)	Boundary Condition	Panel Size (mm)
CFRP [0/±45/90] _{2s}	S8R Shell	4.0	Pinned / Clamped	300 × 200
GFRP [0/90] _{4s}	S8R Shell	4.0	Pinned / Clamped	300 × 200
CFRP Stiffened Panel	S8R + COH3D8	5.0	Clamped	450 × 300

Mesh Sensitivity Study

Seven mesh densities spanning 0.5 to 8.0 elements/mm² were evaluated. For each density, three response metrics were monitored: peak in-plane normal stress σ_{11} at the panel centroid, first-ply-failure load (Hashin fibre criterion), and the lowest linear buckling eigenvalue. All metrics were normalised against the finest mesh (8.0 el/mm²) result. Fig. 1 presents the full convergence study.

The linear buckling eigenvalue converges fastest because it is an integral energetic quantity associated with a global mode shape rather than a pointwise field variable: error falls below 3 % already at 2.0 el/mm². Peak ply stress, which involves a near-singularity at free edges, requires 4.0 el/mm² to reach the 1.5 % convergence threshold. First-ply-failure load errors exceeded 8 % at densities below 1.0 el/mm², a regime where many rapid design-iteration analyses operate. At 4.0 el/mm², all metrics are within 1.2 % of the reference solution at approximately 25 % of the computational cost of the finest mesh. This density is identified as the optimal operating point for the panel configurations studied [16, p. 248].

Boundary Condition Sensitivity and Fixture Characterisation

Four idealised boundary condition cases were applied: (SS–SS) simply supported on all edges, (SS–C) simply supported loaded edges with clamped unloaded edges, (C–SS), and (C–C) fully clamped on all edges. The spread in predicted linear buckling load between SS–SS and C–C reached 18 % (Fig. 2a), confirming that boundary condition uncertainty is the dominant source of prediction error for these panel configurations – exceeding typical material property uncertainty by a factor of approximately four.

To quantify the improvement obtainable by characterising rather than assuming boundary condi-

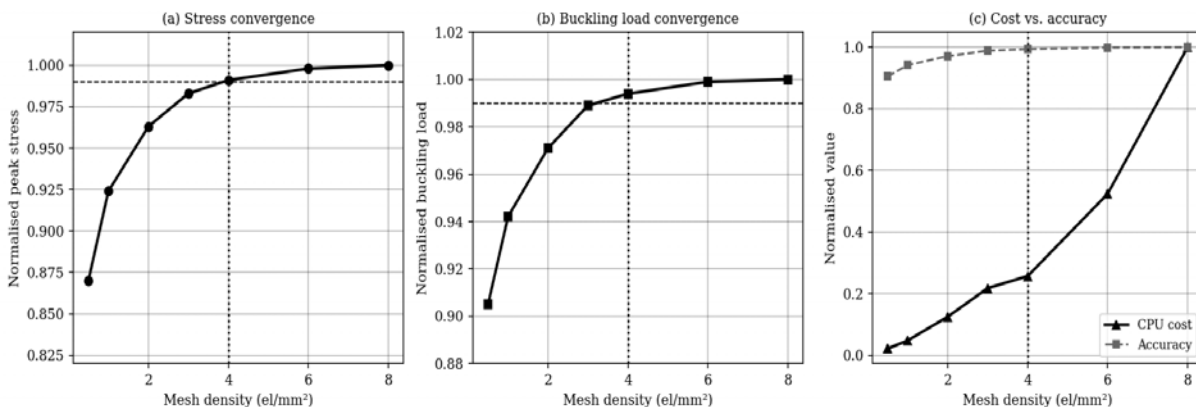


Fig. 1. Mesh convergence study results: (a) normalised peak stress; (b) normalised buckling load; (c) CPU cost vs. accuracy, identifying 4.0 el/mm² as the optimal efficiency point (all metrics within 1.2 %)

tions, the rotational stiffness at each loaded edge was measured using a calibration test: a short cantilever of known geometry was clamped in the test fixture and the moment-rotation relationship was recorded. The measured stiffness ($k\theta = 3.6 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ per metre of edge) was applied as a distributed torsional spring in the FE model. Maximum buckling load prediction error dropped from 15 % (assumed BC) to 4.5 % (characterised BC) across all five panel configurations (Fig. 2b), representing a threefold improvement.

Post-Buckling Behaviour and Progressive Delamination

Post-buckling analyses used the modified Riks arc-length method in Abaqus/Standard to trace the equilibrium path beyond the initial buckling point. Fig. 3a presents load-displacement curves for both boundary condition cases, comparing FEA predictions against experimental data.

Clamped panels maintained a stable post-buckling plateau and ultimately carried 2.6 times the linear buckling load before delamination-triggered collapse [1, p. 1210]. Pinned panels reached approximately 1.8 times the buckling load, as delamination initiated earlier at the simply-supported boundaries. Elastic post-buckling analyses (without cohesive zone delamination) overestimated failure loads by 28–34 % across all configurations. Adding B–K cohesive zone elements reduced this error to 6.2 %. The remaining gap is attributed to fibre-direction micro-buckling in 0° plies under high compressive loads [17, p. 733], a mechanism not included in the present model.

Buckling Mode Shapes

Fig. 4 presents normalised out-of-plane displacement contours for the three principal analysis states:

first linear mode under pinned conditions (single half-wave), first linear mode under clamped conditions (double half-wave), and the post-buckling deformed state at $2.6 \times P_{cr}$. The transition from single to double half-wave between pinned and clamped cases explains the 18 % buckling load difference: the effective buckling length is halved by the rotational restraint, increasing the critical load in proportion to the square of the half-wave number [12, p. 5]. The post-buckling deformation field shows mode coupling and displacement concentration consistent with the measured DIC pattern.

Error Budget and Modelling Protocol

Fig. 5 synthesises prediction errors and sensitivities across all modelling choices. Boundary condition characterisation yields the highest return on analytical investment: the 15 % $\rightarrow$ 4.5 % reduction is achieved without any increase in model size. Progressive damage modelling eliminates a 28–34 % non-conservative bias in failure load at the cost of additional preprocessing. Mesh density is important only at extremes: below 1.0 el/mm^2 errors exceed 8 %; above 4.0 el/mm^2 further refinement offers diminishing returns. Material property uncertainty contributes $\pm 4.5 \%$ when properties are characterised to ASTM standards – smaller than boundary condition effects by a factor of more than three.

Based on these findings, the following validated four-step modelling protocol is recommended: (1) Characterise fixture rotational stiffness before the structural test and apply measured distributed torsional spring boundary conditions – never assume idealised pinned or clamped conditions without verification. (2) Use S8R elements at minimum 4.0 el/

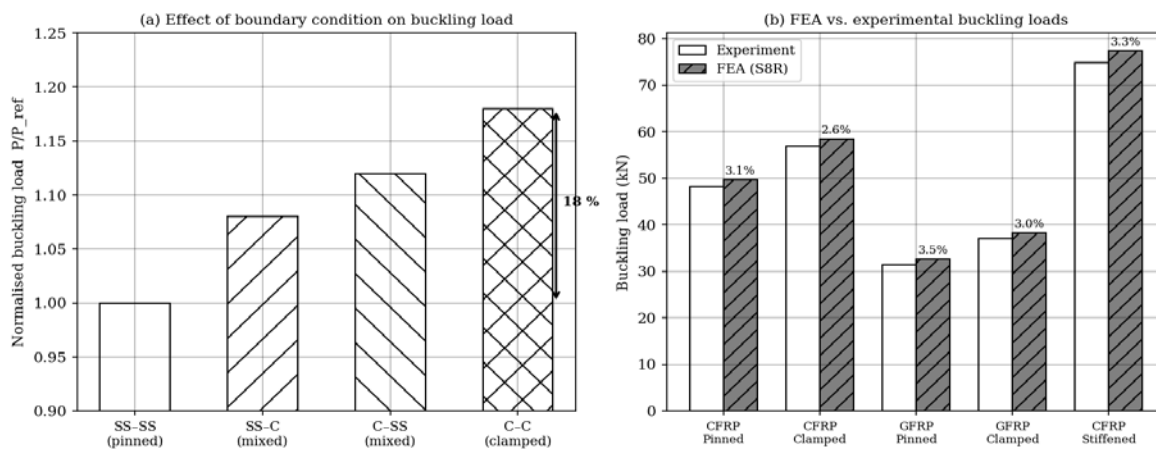


Fig. 2. (a) Effect of boundary condition idealisation on normalised linear buckling load – 18 % spread between pinned and clamped cases; (b) FEA vs. experimental buckling loads for all panel configurations; percentage values indicate prediction error

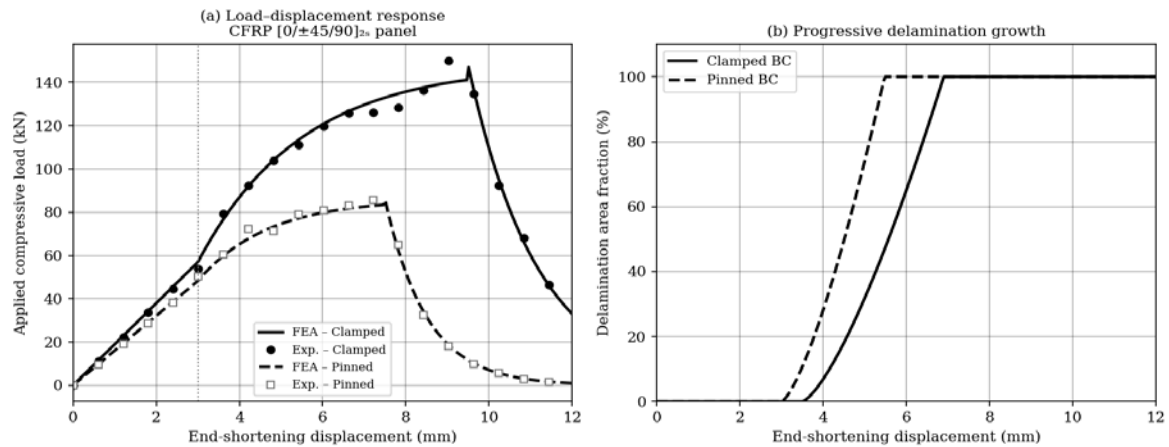


Fig. 3. (a) Load–displacement curves comparing FEA (lines) against experimental measurements (symbols) for clamped and pinned CFRP panels; (b) progressive delamination area fraction vs. end-shortening displacement for both boundary condition cases

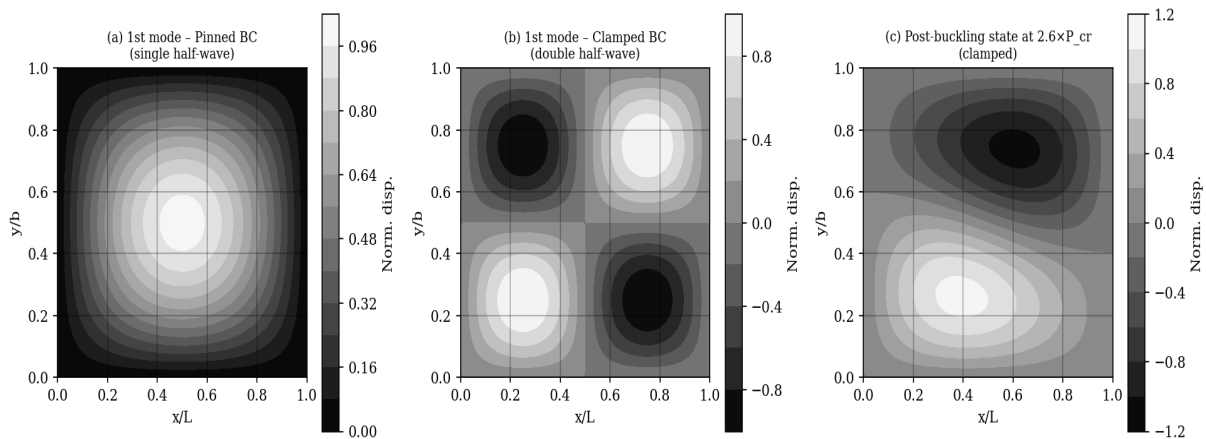


Fig. 4. Normalised out-of-plane displacement contours: (a) 1st linear buckling mode, pinned BC – single half-wave; (b) 1st linear buckling mode, clamped BC – double half-wave; (c) post-buckling deformed state at 2.6×P_{cr} (clamped)

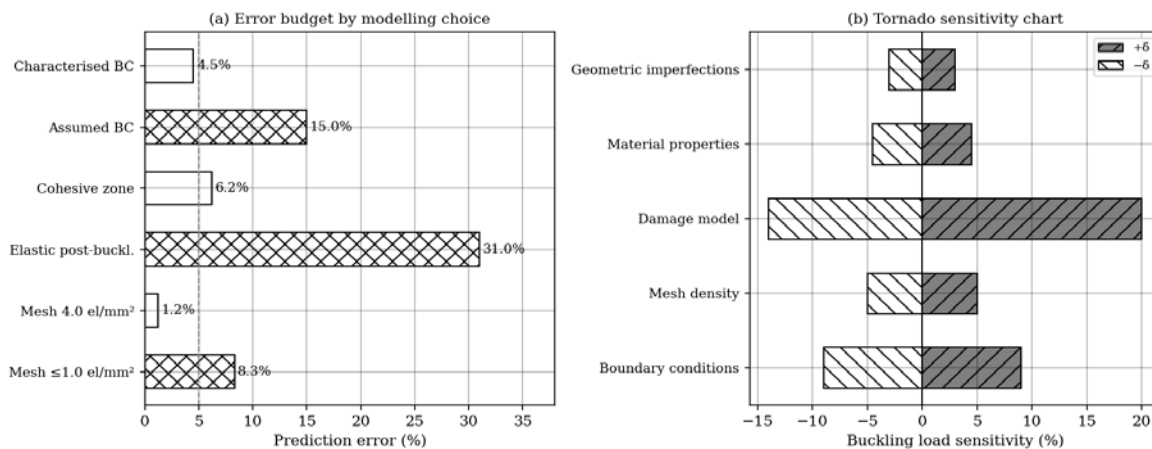


Fig. 5. (a) Prediction error budget: cross-hatched bars indicate inadequate modelling choices; plain bars indicate recommended choices; (b) tornado sensitivity chart ranking contribution of individual parameters to variability in predicted buckling load

mm² for the panel field, with local refinement to 6.0 el/mm² near geometric features. (3) Include cohesive zone delamination for any analysis extending into the post-buckling regime. (4) Validate against full-field DIC strain measurements at a sub-buckling load level before committing to failure load predictions.

Conclusions

1. A mesh density of 4.0 el/mm² with S8R shell elements achieves convergence within 1.2 % for peak ply stress, first-ply-failure load, and linear buckling eigenvalue at approximately 25 % of the cost of the finest mesh tested. Analyses at densities below 1.0 el/mm² carry errors exceeding 8 %, sufficient to compromise structural margins.
2. Boundary condition idealisation introduces an 18 % spread in predicted buckling load – larger than typical material property uncertainty. Fixture stiffness characterisation before structural testing and application of measured rotational spring boundary conditions reduces prediction error from up to 15 % to below 4.5 %.

3. Elastic post-buckling analyses systematically overestimate failure loads by 28–34 %. Cohesive zone delamination modelling with the B–K criterion reduces this non-conservative error to 6.2 %, making progressive damage an essential component of any post-buckling design analysis.

4. CFRP panels with clamped boundary conditions sustain loads up to 2.6 times the linear buckling eigenvalue before collapse – a post-buckling reserve correctly predicted only when progressive interlaminar damage is included.

5. The four-step modelling protocol validated in this study provides practising aerospace structural analysts with a clear, experimentally supported framework for composite panel stability analysis. Future work will extend the approach to thermally loaded panels representative of supersonic leading-edge structures and will incorporate fibre-direction kink-band micro-buckling models to close the remaining 6 % failure load gap.

Bibliography:

1. Falzon B. G., Robinson P., Davies G. A. O. Numerical modelling of damage and failure in advanced composite structures. *Aeronautical Journal*. 2015. Vol. 119, No. 1220. P. 1199–1236. DOI: 10.1017/S0001924000011258.
2. Bisagni C., Vescovini R. Analytical formulation for local buckling and post-buckling analysis of stiffened laminated panels. *Thin-Walled Structures*. 2009. Vol. 47, No. 3. P. 318–334. DOI: 10.1016/j.tws.2008.07.006.
3. Orifici A. C., Herszberg I., Thomson R. S. Review of methodologies for composite material modelling incorporating failure. *Composite Structures*. 2008. Vol. 86, No. 1–3. P. 194–210. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.03.007.
4. Lekhnitskii S. G. Theory of Elasticity of an Anisotropic Body. Mir Publishers, Moscow, 1981. 430 p.
5. Reddy J. N. Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, 2004. 858 p. DOI: 10.1201/b12409.
6. Chang F. K., Lessard L. B. Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to compressive loadings. *Journal of Composite Materials*. 1991. Vol. 25, No. 1. P. 2–43. DOI: 10.1177/002199839102500101.
7. Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics*. 1980. Vol. 47, No. 2. P. 329–334. DOI: 10.1115/1.3153664.
8. Camanho P. P., Dávila C. G. Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials. NASA/TM-2002-211737. National Aeronautics and Space Administration, Hampton, VA, 2002. 42 p.
9. Turon A., Camanho P. P., Costa J., Dávila C. G. A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading. *Mechanics of Materials*. 2006. Vol. 38, No. 11. P. 1072–1089. DOI: 10.1016/j.mechmat.2005.10.003.
10. Barbero E. J. Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus. CRC Press, Boca Raton, 2020. 480 p. DOI: 10.1201/9781315141329.
11. Bisagni C. Numerical analysis and experimental correlation of composite shell buckling and post-buckling. *Composites Part B: Engineering*. 2000. Vol. 31, No. 8. P. 655–667. DOI: 10.1016/S1359-8368(00)00031-7.
12. Nemeth M. P. Buckling Behavior of Long Symmetrically Laminated Plates Subjected to Combined Loadings. NASA Technical Paper TP-3195. National Aeronautics and Space Administration, Hampton, VA, 1992. 59 p.
13. Camanho P. P., Bessa M. A., Catalanotti G., Vogler M., Rolfes R. Modeling the inelastic deformation and fracture of polymer composites. *Mechanics of Materials*. 2013. Vol. 59. P. 36–49. DOI: 10.1016/j.mechmat.2012.12.013.
14. Turon A., Dávila C. G., Camanho P. P., Costa J. An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007. Vol. 74, No. 10. P. 1665–1682. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2006.08.025.
15. Benzeggagh M. L., Kenane M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. *Composites Science and Technology*. 1996. Vol. 56, No. 4. P. 439–449. DOI: 10.1016/0266-3538(96)00005-X.
16. Llobet J., Maimi P., Turon A., Bak B. L. V., Lindgaard E. A continuum damage model for composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 100. P. 248–259. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.05.022.

17. Soutis C., Curtis P. T. A method for predicting the fracture toughness of CFRP laminates failing by fibre microbuckling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2000. Vol. 31, No. 7. P. 733–740. DOI: 10.1016/S1359-835X(00)00003-2.
18. Krueger R. Virtual crack closure technique: History, approach and applications. *Applied Mechanics Reviews*. 2004. Vol. 57, No. 2. P. 109–143. DOI: 10.1115/1.1595677.
19. Muc A., Romanowicz M. Buckling and postbuckling behavior of thin-walled composite structures. *Composite Structures*. 2021. Vol. 260. 113243. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113243.
20. Tsai S. W., Wu E. M. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*. 1971. Vol. 5, No. 1. P. 58–80. DOI: 10.1177/002199837100500106.
21. Hao P., Wang B., Li G., Meng Z., Tian K., Tang X. Hybrid optimization of hierarchical stiffened shells based on smeared stiffener method and finite element method. *Thin-Walled Structures*. 2014. Vol. 82. P. 46–54. DOI: 10.1016/j.tws.2014.04.004.
22. ASTM D5528-13. Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. DOI: 10.1520/D5528.
23. ASTM D7905/D7905M-19. Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. DOI: 10.1520/D7905_D7905M.
24. ASTM D6641/D6641M-16. Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. DOI: 10.1520/D6641_D6641M.
25. Abramovich H. Stability and Vibrations of Thin-Walled Composite Structures. Woodhead Publishing, Cambridge, 2017. 770 p. DOI: 10.1016/C2015-0-01667-5.

Юніс Б.Н. СКІНЧЕННОЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ШАРУВАТИХ КОМПОЗИТНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ АЕРОКОСМІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ: ЧУТЛИВІСТЬ ДО СІТКИ, ГРАНИЧНІ УМОВИ ТА ПОВЕДІНКА ПРИ ВТРАТІ СТІЙКОСТІ ПІД КОМБІНОВАНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Точне скінченноелементне (СЕ) моделювання панелей із армованих волокном полімерних композитів є обов'язковою умовою надійної сертифікації конструкцій у галузі аерокосмічної техніки. Незважаючи на широке застосування методу скінченних елементів (МСЕ), аналітики стикаються з трьома фундаментальними питаннями: яка мінімальна густина сітки є достатньою, яка похибка граничних умов є допустимою та яку практичну вигоду дає включення прогресивного пошкодження у пост-критичний аналіз. Дана стаття системно і кількісно відповідає на всі три питання для представницьких геометрій аерокосмічних панелей із CFRP та GFRP. Результати дослідження спростовують низку поширених припущень. По-перше, достовірність граничних умов самостійно визначає розкид прогнозованого лінійного критичного навантаження до 18% між шарнірно-опертим та жорстко заземленими краями, що перевищує сукупний вплив розсіювання властивостей матеріалу. По-друге, прогнози критичного навантаження при чисто пружному пост-критичному аналізі перевищують експериментальні значення на 28–34 %; включення когезивної зонної моделі розшарування зменшує цей відхил до 6,2 %. По-третє, дослідження чутливості до сітки на шести рівнях густини встановило 4,0 ел./мм² з оболонковими елементами S8R як поріг збіжності, при якому точність усіх розглянутих характеристик відгуку знаходиться у межах 1,2 % за витрат обчислювального часу близько 25 % від найбільш дрібної перевіреної сітки. Усі числові прогнози верифіковано за вимірюваннями методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) при випробуваннях панелей під комбінованим стисненням та зсувом у площині. Похибки критичного навантаження залишилися нижче 4,5 %, а похибки граничного навантаження руйнування – нижче 6,2 % для всіх конфігурацій. Коефіцієнт просторової кореляції між вимірними та розрахованими полями деформацій становить $R^2 = 0,971$. Запропонований верифікований протокол моделювання надає практикуючим структурним аналітикам чіткий алгоритм дій при проектуванні композитних авіаційних панелей.

Ключові слова: метод скінченних елементів, шаруваті композити, чутливість до сітки, граничні умови, втрата стійкості, пост-критична поведінка, CFRP, GFRP, прогресивне пошкодження, когезивна зона, аерокосмічні панелі.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

УДК 629.584

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/06>

Казарєзов А.Я.

<https://orcid.org/0000-0001-8586-5596>

Миколаївський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ АВТОНОМНОЇ ПІДВОДНОЇ ТЕХНІКИ З БУКСИРУВАННЯМ РАДІОБУЄМ

Виконано постановку завдання щодо підходу до серійного створення автономного підводного апарата з радіобуєм на основі поєднання цивільного та оборонного призначення, яке передбачає захист акваторій.

В теорії автономний ненаселений підводний апарат з радіобуєм є можливим рішенням, яке поєднає переваги та усуває недоліки, які властиві прив'язній підводній техніці у вигляді отримання інформації в режимі реального часу та обмеження площі робочої зони, а у випадку автономної підводної техніки – незалежності від судна забезпечення та неможливості миттєвого отримання інформації про стан підводної обстановки.

Розглянуто алгоритм створення такої підводної техніки на основі енергетичного критерію, який має базовий вплив на інші складові системного підходу. Запропоновано розглядати енергетичний критерій у найбільш енергонавантаженому режимі роботи самохідного прив'язного підводного апарата, коли потужність, яка споживається його рушійно-кормовим комплексом, максимальна.

Таким чином, отримана сума потужностей, як апарата, так і системи в цілому буде максимальна, коли будуть враховані максимальні потужності складових і їх елементів з врахуванням одночасності роботи. Порівняння максимальної потужності з потужністю, що задана за технічним завданням, буде енергетичним критерієм, який буде визначати можливість створення автономного підводного апарата з радіобуєм за ним.

Продемонстровано взаємозв'язок експлуатаційних параметрів та конструктивних характеристик, що дозволяє визначити доцільність побудови автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм на ранній стадії з використанням системного підходу, виходячи з конкретної підводної технології, для якої він розроблений.

Ключові слова: автономний ненаселений підводний апарат, енергетичний критерій, кабель-буксир, технічне завдання, рушійно-кормовий комплекс, безпілотна система.

Постановка проблеми. Розвиток безпілотних систем набуває широкого вжитку як у військових так і у цивільних задачах. Це пов'язано з все більшим розростанням війовничих настроїв у світі. Технічний прогрес у цьому напрямку, який поступово «перетікає» з військового застосування у цивільне породжує виникнення міжгалузевих рішень, що є вже не військовими, але і повністю цивільними їх назвати не можливо [9].

У зв'язку з цим захист акваторій портів від підводних та надводних загроз вимагає при використанні підводної техніки часткову відмову від залучення самохідних прив'язних підводних систем,

але при цьому збереження можливості керування апаратом в реальному часі за участі оператора. Це передбачає набуття підводним апаратом автономності з наявністю гнучкого зв'язку, але без жорсткої прив'язки до бази у вигляді судна забезпечення [10].

Таким рішенням може бути автономний ненаселений підводний апарат з радіобуєм, який може мати низку автоматичних, автоматизованих чи ручних режимів керування. Однією з задач створення серійної кількості таких апаратів певної модифікації є підхід до їхнього системного проєктування, яке визначатиме можливість практич-

© Казарєзов А.Я., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



ної реалізації такого виду техніки вже на ранніх етапах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Керування засобами підводної техніки зазвичай відбувається при застосуванні спеціалізованих джойстиків, які надають змогу оперативно реагувати на параметри підводного середовища та надводної обстановки. Ефективність та зручність такого підходу вже є стандартним рішенням при керуванні самохідним прив'язним підводним апаратом (СППА) та може бути адаптовано для автономного ненаселеного підводного апарата (АНПА) з радіобуєм (РБ) з елементами автоматизації [3]. Взаємодія АНПА з РБ відбувається завдяки кабель-буксиру (КБ), тому загалом таку систему з трьох складових можливо сприймати як підводний комплекс, в якому КБ є гнучким зв'язком. Довжина КБ та форма, яку він приймає в потоці води при визначеному його діаметрі суттєво впливає на характеристики керування таким комплексом. Особливості зазначеного керування висвітлені в роботах Блінцова О. В. [4, 5, 6]. Для задач моніторингу акваторій доречним буде використання певної оптимальної кількості АНПА з РБ, що передбачає їхнє поєднання в систему, яка дозволить здійснювати керування ними за визначеним алгоритмом. Опис особливостей зазначеного групового керування надано в дисертаційній роботі Алоби Л. Т. [7]. При русі АНПА з РБ акваторією він обов'язково має оминати перешкоди, які зустрічаються на траєкторії, тому при заздалегідь відомих геометричних характеристиках цих перешкод, апарат має їх оминати в автоматичному чи принаймні в автоматизованому режимі. Засади принципів руху АНПА з РБ при зустрічі з перешкодою висвітлені у монографії колективу авторів [8].

Таким чином, теорії застосування автономної підводної техніки з буксированим радіобуєм приділено значну увагу в технічних літературних джерелах, які пояснюють особливості керування таким типом об'єкта при русі акваторією, але питанням можливості створення АНПА з РБ на ранніх стадіях проектування з огляду на тривалість місії, яка визначається ємністю акумуляторної батареї та характеристиками КБ в потоці води, не надавалося значного опису в межах системного підходу.

Постановка завдання. При проектуванні підводних об'єктів з гнучким зв'язком у вигляді кабель-троса чи кабель-буксира в рамках системного підходу складною задачею є саме відслідковування взаємного впливу матеріального, енергетичного, інформаційного та функціонального факторів. Завданням є розгляд можливості створення автономного ненаселеного підводного апа-

рата з радіобуєм при спиранні на енергетичний фактор, який має суттєвий вплив на інші внаслідок взаємозв'язку характеристик кабель-буксира, робочої зони та тривалості місії.

Виклад основного матеріалу. Особливістю автономної підводної техніки є те, що, наприклад, на відміну від СППА, відслідкувати просторове положення АНПА в водному середовищі є складною навігаційною задачею. Для того, щоб використати переваги СППА та АНПА для задач моніторингу портової інфраструктури, виникає необхідність пошуку комбінованого рішення. У зв'язку з цим використання буксированого радіобуя в поєднанні з АНПА є прийнятною альтернативою, так як РБ надає можливість відслідкувати просторове положення АНПА, а сам апарат не обмежений особливостями використання кабель-троса, який поєднує його з судном забезпечення та суттєво впливає на площу робочої зони апарата.

На основі загальної методики проектування самохідних прив'язних підводних систем, в основу якої покладено використання системи рівнянь їхнього існування, можливо системно оцінити проєктні рішення створення АНПА з РБ за матеріальними M , енергетичними E , інформаційними I та функціональними F критеріями. Це дає змогу вже на ранніх стадіях проектування встановити можливість створення такого виду техніки із заданими характеристиками [1].

На її основі розглянемо алгоритм визначення можливості створення АНПА з РБ на ранніх стадіях проектування за критерієм енергоживлення (рис. 1).

Базою, що визначає можливість створення АНПА з РБ на ранніх стадіях проектування, є технічне завдання (ТЗ) (блок 1 на рис. 1). Тут задаються кількісні характеристики АНПА з РБ, зокрема: напруга $U_{\text{АНПА}}$, швидкість $v_{\text{АНПА}}$, глибина $H_{\text{АНПА}}$ руху АНПА, довжина $L_{\text{КБ}}$ попущеної частини КБ, а також просторові координати корінного кінця КБ $\{x_K, y_K, z_K\}$, який закріплений на РБ, та ходового кінця КБ $\{x_X, y_X, z_X\}$, який закріплений на АНПА. Вказані вимоги ТЗ є умовами обмеження, які забезпечать задовільне функціонування АНПА з РБ для виконання поставлених завдань.

Після опрацювання даних ТЗ виконується конструювання складових АНПА з РБ з існуючих елементів, вузлів чи систем, які доступні на світовому ринку, а також елементів, вузлів чи систем, які були раніше створені та випробувані організацією, яка є головною у створенні АНПА з РБ, чи організаціями-партнерами, які можуть ці елементи надати за певних умов (блок 2).

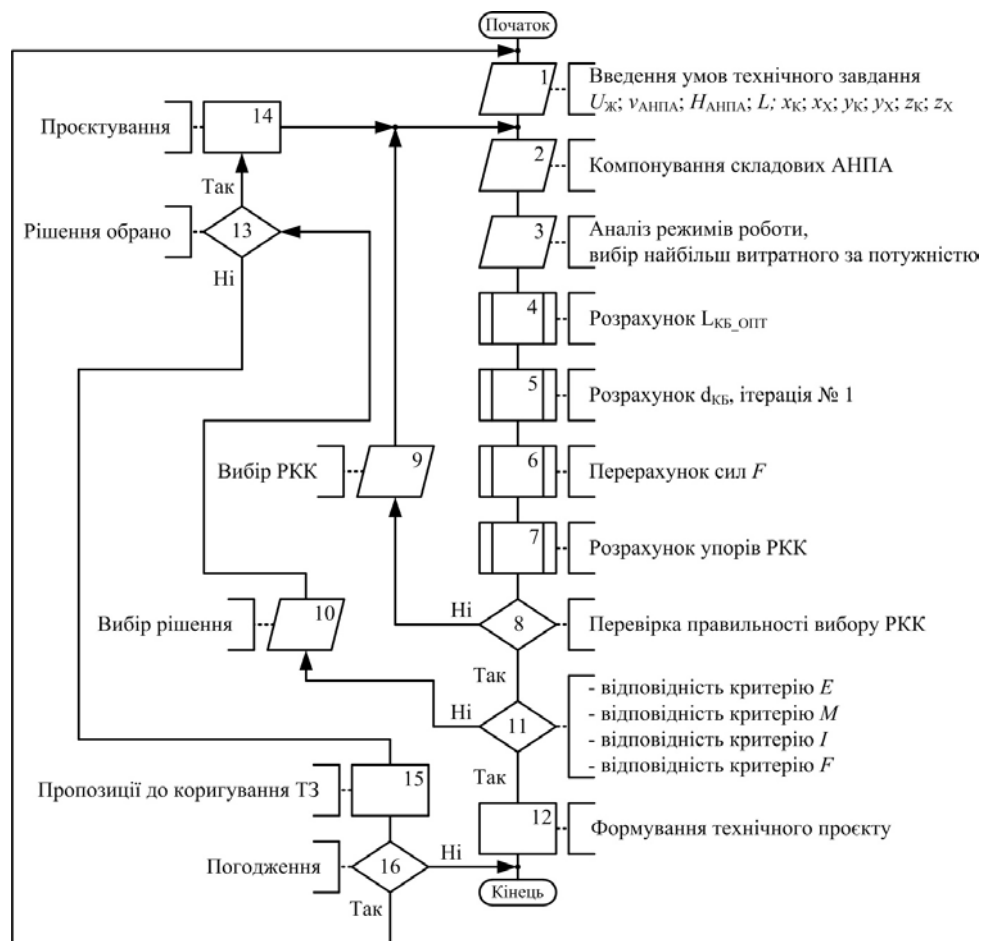


Рис. 1. Алгоритм визначення можливості створення АНПА з РБ

Наступним кроком є аналіз режимів роботи АНПА з РБ (блок 3). Тут виконується вибір найбільш енерговитратного режиму, що визначається положенням АНПА відносно РБ, в якому його рушійно-кермовий комплекс (РКК) споживає найбільшу потужність. Такий режим зазвичай виникає, коли апарат знаходиться попереду РБ і рухається проти течії, намагаючись підтримувати оптимальну довжину КБ між ними.

Далі виконується розрахунок оптимальної довжини КБ $L_{\text{КБопт}}$ і розрахунок його діаметру (блоки 4 та 5). Потім перераховуються сили $F_{\text{х}}$ на ходовому кінці КБ для визначення упорів РКК апарата (блоки 6 і 7).

Наступним етапом проєктування є перевірка правильності вибору РКК (блок 8). Якщо ця перевірка не задовольняє умовам ТЗ, то обирається більш потужний рушійний пристрій чи змінюється конфігурація РКК АНПА (блок 9).

Коли перевірка дає позитивний результат, виконується перехід до рівнянь існування АНПА [2], за допомогою яких вже на ранніх стадіях проєктування є можливість визначити можливість

створення АНПА (блок 10). Тут встановлюється відповідність проєкту АНПА з РБ енергетичному E , матеріальному M , інформаційному I та функціональному F критеріям його існування.

У випадку, якщо рівняння існування задовольняють умовам ТЗ (блок 11), наступним кроком є формування документації щодо завершення ранньої стадії розробки та перехід до формування технічного проєкту (блок 12).

Якщо за будь-яким критерієм рівняння існування характеристика СППС не відповідає умовам ТЗ, необхідно переходити до пошуку рішення, яке забезпечить виконання умов, що заявлені (блок 13). Основною дією цього рішення буде процес проєктування елементу(-ів), що забезпечить виконання рівняння існування, яке призвело до необхідності пошуку рішення (блок 14).

Відсутність будь-якого рішення, яке задовольняє умовам ТЗ, викликає необхідність формування пропозицій до коригування останнього (блок 15). Погодження зі змінами ТЗ (блок 16) повертає проєктанта до початку алгоритму, а від-

мова призводить до висновку про неможливість створення такого варіанту АНПА з РБ.

Таким чином, методика проектування системи енергоживлення АНПА з РБ є складовою узагальненої методики проектування такого виду техніки на основі системного підходу.

Основою результатів викладок, які розглянуті, є намагання досягти комплексного підходу до проектування АНПА з РБ з метою надати відповідь на головне питання, яке полягає у можливості його створення. Це питання особливо актуально на ранніх стадіях проектування, коли помилки в основних підходах можуть призвести до перевитрати трудових та фінансових ресурсів чи взагалі до неможливості більш-менш успішного закінчення проекту.

Висновки. З огляду на світову практику поступового застосування військових технічних рішень для вирішення цивільних задач запропоновано для моніторингу акваторій застосовувати безпілотні системи у вигляді автономного підводного апарата з радіобуєм. Таке рішення дозволить

поєднати перевагу прив'язної підводної техніки з огляду на відображення інформації в реальному масштабі часу та перевагу автономної підводної техніки щодо вільного руху акваторією.

Для можливості оцінки створення автономного підводного апарата з радіобуєм розглянуто системний підхід, який базується на чотирьох критеріях – матеріальному, енергетичному, інформаційному та експлуатаційному. Як приклад наведено алгоритм за енергетичним критерієм, який суттєво визначає вплив на інші критерії системного підходу, тому що існує взаємозв'язок між діаметром кабель-буксира, який має гідродинамічний опір на течії, ємністю енергетичної установки та тривалістю місії.

В подальшому пропонується деталізувати взаємозв'язки між критеріями системного підходу, щоб надавати відповідь про можливість створення автономного підводного апарата з радіобуєм на ранніх стадіях проектування з перспективою виходу на серійне виробництва оптимального зразка.

Список літератури:

1. Blintsov V. S., Klochkov O. P. Generalized method of designing unmanned remotely operated complexes based on the system approach. *Scientific journal «EUREKA: Physics and Engineering»*. 2019. Vol. 2 (21). P. 43-51. doi:10.21303/2461-4262.2019.00878
2. Блінцов, В.С., Ключков О.П. Рівняння існування самохідної прив'язної підводної системи як оцінка можливості її створення. *Журнал «Підводні технології»*. Київ : КНУБА, 2016. № 3. С. 25-30.
3. Eirik Hexeberg Henriksen, Ingrid Schjølberg, Tor Berge Gjersvik. Adaptable Joystick Control System for Underwater Remotely Operated Vehicles. – IFAC (International Federation of Automatic Control) Hosting by Elsevier Ltd., 2016. – PapersOnLine 49-23. Pp 167-172. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.338>
4. Блінцов О.В. Розвиток теорії автоматичного керування рухом підводних комплексів з гнучкими зв'язками. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.03 « Системи та процеси керування ». – Національний університет « Львівська політехніка », Львів, 2017. (Для службового користування).
5. Dudykevych, V., Oleksandr, B. Tasks statement for modern automatic control theory of underwater complexes with flexible tethers. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2016. 25-36 p. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00158>
6. Блінцов О.В. Системи автоматичного керування рухом підводних комплексів з гнучкими зв'язками: навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2018. – 251 с.
7. Алоба Л. Т. Автоматизація групового керування автономними ненаселеними підводними апаратами пошукового типу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.03 « Системи та процеси керування ». – Національний університет « Львівська політехніка », Львів, 2021.
8. Блінцов В.С., Сірівчук А.С., Надточій А.В., Надточій В.А. Автоматизація керування автономним ненаселеним підводним апаратом з радіобуєм. Наукова монографія. Херсон : Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 2022. 196 с.
9. Блінцов В. С., Блінцов О. В., Надточій В.А. Протимінні прив'язні підводні апарати і системи: наукова монографія. Миколаїв : НУК, 2015. – 108 с. (Для службового користування)
10. Блінцов, В. С., Костенко Д.В., Трибулькевич В.В., Соколов В.В. Сучасні завдання створення багатопільового морського безпілотного комплексу. 36. наук. праць НУК. Миколаїв: НУК, 2017. № 2. С. 20-27.

**Kazariezov A.Ya. THE APPLICATION FEATURES OF THE SYSTEM APPROACH
IN AN AUTONOMOUS UNDERWATER EQUIPMENT WITH A TOWED RADIOBUOY DESIGN**

The task of setting an approach to the serial an autonomous uninhabited underwater vehicle with a radiobuoy creation based on a combination of civil and defense purposes, which involves protecting port water areas with the detection of unauthorized penetration by enemy elements, has been completed.

In a theoretical sense, an autonomous uninhabited underwater vehicle with a radiobuoy is a possible solution to combine the advantages and eliminate the disadvantages inherent in tethered underwater technology in the form of presenting information in real time and limiting the area of the working area, and autonomous underwater technology - independence from the support vessel and the impossibility of instantly obtaining information about the state of the underwater situation, is explained.

The algorithm for creating such underwater equipment based on the energy criterion, which has a fundamental impact on other components of the system approach at the early stages of design, is considered. It is proposed to consider the energy criterion in the most energy-intensive mode of operation of an autonomous uninhabited underwater vehicle, when the power consumed by its propulsion and steering complex is maximum.

The resulting sum of the vehicle's capacities will be maximum when the maximum capacities of the components of the propulsion and steering complex are taken into account, taking into account the simultaneity of their operation is envisaged. Comparison of the maximum capacity with the capacity specified in the technical specifications will be the energy criterion that will determine the possibility of creating an autonomous uninhabited underwater vehicle with a radiobuoy based on it.

The interrelation of operational parameters and design characteristics makes it possible to determine the feasibility of building an autonomous uninhabited underwater vehicle with a radiobuoy at an early stage using a systems approach, based on the specific underwater technology for which it is designed, has been demonstrated.

Keywords: *autonomous uninhabited underwater vehicle, energy criterion, cable tug, technical specifications, propulsion and steering complex, unmanned system.*

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Казимиренко Ю.О.<https://orcid.org/0000-0002-7120-8226>

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Грудініна Г.С.<https://orcid.org/0000-0001-8298-9251>

Херсонський навчально-науковий інститут

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ КОРПУСІВ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

Проектування підводних конструкцій, зокрема автономних ненаселених підводних апаратів (АНПА) з буксированим радіобуєм, пов'язане зі складною взаємодією гідродинамічних, механічних і керуючих процесів, що відбуваються в умовах змінного зовнішнього середовища. Експериментальні дослідження таких систем є вартісними, тривалими та обмеженими за варіативністю умов, що зумовлює необхідність застосування сучасних засобів програмного моделювання на етапах проектування та оптимізації. Використання чисельних методів дозволяє дослідити вплив форми корпусу АНПА, параметрів несучих поверхонь, характеристик рушійно-керуючого комплексу, а також динаміки кабелю та буксированого буя на загальну стійкість і керованість системи.

Особливістю системи «АНПА – кабель – радіобуй» є наявність додаткових нелінійних збурень, спричинених хвильовими процесами, течіями та змінним натягом кабелю, що суттєво ускладнює аналітичний опис і вимагає застосування багатозначних моделей. У цьому контексті доцільним є використання спеціалізованого програмного забезпечення, такого як AUV SIM компанії Dynautics Ltd, яке забезпечує моделювання руху підводних апаратів у реалістичних умовах експлуатації. Даний програмний продукт дозволяє враховувати гідродинамічні сили та моменти, параметри навколишнього середовища, а також реалізовувати алгоритми автоматичного керування.

Застосування AUV SIM на етапі проектування дає змогу зменшити кількість натурних експериментів, підвищити точність оцінки експлуатаційних характеристик і здійснити оптимізацію конструктивних параметрів системи ще до її фізичної реалізації. Таким чином, програмне моделювання є ключовим інструментом підвищення ефективності розробки АНПА з буксированим радіобуєм та забезпечення їх надійної роботи в складних гідрометеорологічних умовах.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, автономний підводний апарат, буксирований буй, гідродинамічна характеристика.

Постановка проблеми. Визначення сучасних засобів комп'ютерного проектування для створення типорозмірного ряду підводних апаратів з буксированими радіобуями різного цільового призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) малого та середнього класу нині активно розвиваються та застосовуються у широкому спектрі задач – від океанографічних і гідрографічних досліджень до екологічного моніторингу, пошуково-рятувальних місій і оборонних операцій.

У статті [1] автори пропонують доповнити поточні дослідження траєкторії руху прив'язаного

підводного апарату за різних швидкостей буксирування. Гідродинамічна модель складається з буксировачного троса, гвинтів з канальними гвинтами та гідрокрил. Для дослідження троса використовується метод скінченних сегментів, який використовує кілька циліндрів, з'єднаних кульовим шарніром. Траєкторія та гідродинамічні характеристики прив'язаного підводного апарату значно змінюються, коли швидкість буксирування змінюється з низької на високу.

В роботі [2] описано недороге та зручне в налаштуванні рішення для керування довжиною нейтрально плавучого троса за допомогою збалансованої системи буй-баласт, реалізованої на частині

троса проксимально до ROV. У систему вбудований датчик кривизни, який допомагає керувати живильником кабелю на поверхні. Це є корисним рішенням для згладжування рухів троса та пом'якшення зовнішніх збурень.

У статті [3] представлено нову систему моделювання для оцінки керування рухом у прив'язаних багатороботних системах у динамічних морських середовищах. Зокрема, вона зосереджена на скоординованій роботі автономного підводного апарату (AUV) та автономного надводного апарату (ASV). Система використовує GazeboSim, вдосконалений реалістичними плагінами морського середовища та режим ArduPilots SoftwareIn-The-Loop (SITL), для забезпечення високоточної платформи моделювання.

Розуміння взаємодії між поверхневими хвилями та плавучими, закріпленими конструкціями є важливою проблемою для проектування морських споруд [4]. Традиційно для вивчення цих проблем використовувався експериментальний аналіз, але використання обчислювального моделювання потенційно може зменшити кількість необхідних експериментальних ітерацій. В роботі бгворюється закріплений сферичний буй, що коливається як через, так і впоперек вільної поверхні, а також взаємодіє з падаючим синусоїдальним хвильовим ланцюгом.

У дослідженні [5] пропонується новий мобільний буй, здатний здійснювати вертикальний профілюючий рух, подібний до профілюючих буїв Argo, та пілкоподібний ковзний рух, подібний до підводних планерів. Запропонований мобільний буй може перемикається між двома режимами руху за допомогою керованих крил.

Авторами роботи [6] було спроектовано, побудовано та випробувано в польових умовах інструментальну платформу на основі буя («О-буй») для цілорічного вимірювання озону над арктичним морським льодом. О-буй працював автономно, щодня здійснюючи двонаправлену передачу даних за допомогою супутникового зв'язку Iridium.

У роботі [7] представлено нелінійну динамічну модель та контролер руху системи, що складається з безпілотного підводного апарату, прикріпленого до плавучого буя у тривимірному просторі. Детальні моделі динаміки БПА, буя та пов'язаної прив'язаної системи представлені в морському середовищі, яке включає поверхневі водні течії та коливальні гравітаційні хвилі, а також пориви вітру.

Сформульовано нову проблему морського локомотива з квадрокоптером, який маніпулює швидкістю хвилі плавучого буя за допомогою

троса [8]. Запропонована роботизована система може мати різноманітні нові застосування для БПЛА, де їх висока швидкість та маневреність, а також легкість розгортання та широке поле зору, дають їм чудову перевагу.

В роботі [9] розглянуто тактико-технічні характеристики морських безекіпажних підводних апаратів провідних країн світу, особливості їх застосування не тільки, як науково-дослідних та допоміжних апаратів, а й як підводних апаратів військового призначення.

В роботі [10] моделюючий комплекс динаміки просторового руху підводного апарату, призначений для розгляду перехідних процесів при русі підводного апарату у товщі води.

У монографії [11,12] розглянуто особливості гідродинамічної взаємодії морських конструкцій із хвильовими та течійними збуреннями в умовах Чорного моря. Значну увагу приділено чисельним методам моделювання та експериментальній верифікації отриманих результатів. Проаналізовано розподіл гідродинамічних навантажень і вплив коливань на стійкість конструкцій. Отримані підходи можуть бути адаптовані для оцінки навантажень на корпус АНПА та буксирований буй у складних гідрометеорологічних умовах.

Актуальність представленої роботи обумовлена необхідністю швидкого впровадження у морську практику новітніх досягнень підводної робототехніки охоронного призначення та необхідністю формування внутрішнього ринку передових морських роботизованих охоронних технологій в інтересах підприємств морегосподарського комплексу України

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Застосування математичного моделювання корпусу апарату з імітацією реальних умов морського середовища надає можливість досягти оптимальних гідродинамічних параметрів АНПА з буксированим радіобуєм без виконання натурних випробувань.

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення методології проектування та дослідження гідродинамічних параметрів корпусу автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм в умовах морського середовища.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Системний аналіз методів і засобів проектування корпусів апаратів з несучими поверхнями та рушійними пристроями.

Імітаційне моделювання у AUV Sim для перевірки гідродинамічних параметрів корпусу АНПА у змодельованому морському середовищі.

Об'єкт дослідження – корпус автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм.

Предмет дослідження – підвищення якості гідродинамічних параметрів автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм.

Виклад основного матеріалу. Морський робототехнічний комплекс «Автономний ненаселений підводний апарат – буксирований радіобуй», призначений для охорони та технічного моніторингу об'єктів морської критичної інфраструктури в умовах мілководних акваторій, який буде забезпечувати оперативний радіозв'язок з береговим центром керування охоронною місією.

В роботі розглядається радіобуй до якого додаються шліфовані дугоподібні несучі поверхні (крила), що дозволяє досягти максимального ефекту піднімальної сили.

Особливістю системи «АНПА – кабель – радіобуй» є наявність додаткових нелінійних збурень, спричинених хвильовими процесами, течіями та змінним натягом кабелю, що суттєво ускладнює аналітичний опис і вимагає застосування багатофізичних моделей.

З метою уточнення параметрів конструкції буя і несучих поверхонь доцільно застосувати засоби комп'ютерного моделювання динаміки буя в реальному морському середовищі. З цією метою в роботі проведено системний аналіз сучасних засобів моделювання.

Основні критерії вибору програмного продукту:

- повноцінне моделювання 6 DOF;
- урахування зовнішніх збурень;
- підтримка tethered-систем;
- інтеграція систем керування;
- гнучкість параметризації;
- спеціалізація на морських апаратах.

Далі представлено огляд деяких програмних продуктів, які найбільш відповідають критеріям поставленої задачі.

UUV Simulator – це відкрите програмне середовище для моделювання автономних ненаселених підводних апаратів, призначене для дослідження їх динаміки, навігації та алгоритмів керування у віртуальному середовищі [13].

UUV Simulator є розширенням ROS + Gazebo і використовується як віртуальний об'єкт керування для автономних підводних апаратів. Він дозволяє відтворювати рух АНПА у тривимірному водному середовищі з урахуванням гідродинаміки та зовнішніх збурень.

Функціональні можливості UUV Simulator:

- моделювання 6-ступеневої динаміки підводного апарата;

- урахування гідродинамічних сил і моментів (додаткові маси, опори, демпфування);

- моделювання течій і збурень середовища;

- підтримка різних рушіїв і керуючих поверхонь;

- інтеграція з алгоритмами керування через ROS-плагіни.

AUV SIM – це комерційний продукт від Британської фірми Dynautics, яка має великий досвід у проектуванні автономних підводних апаратів та підводних споруд [14]. AUV SIM це повний 3D симулятор динаміки руху автономного підводного апарату з урахуванням можливого впливу течії.

Функціональні можливості AUV SIM:

- створення моделі корпусу апарату з вибором рушіїв;

- імітація руху апарата в морському середовищі;

- можливість обробляти отримані результати.

Важливим фактором для розробників і проєктувальників корпусів підводних роботизованих засобів, яким є АНПА з радіобуєм є можливість створювати модель власного корпусу підводної конструкції використовуючи зручний, зрозумілий користувацький інтерфейс, рис. 1.

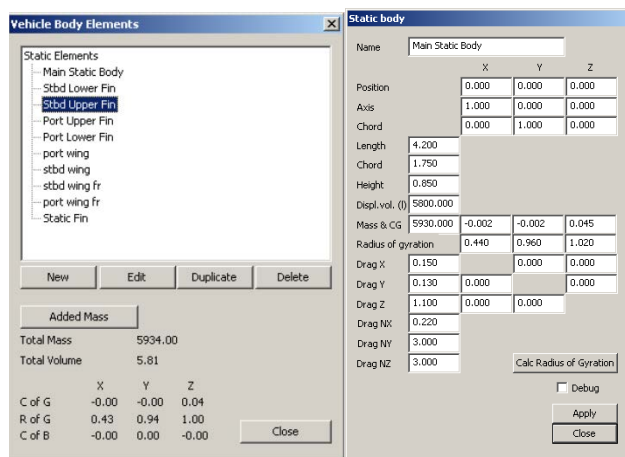


Рис. 1. Інтерфейс створення моделі корпусу АНПА засобами AUV SIM

Наступним етапом розробки необхідного для виконання конкретної місії АНПА є додавання несучих поверхонь (крил), що також передбачено програмним продуктом.

Але головною перевагою є можливість проведення імітаційного моделювання розробленої підводної конструкції в умовах морського середовища. Зручний інтерфейс дозволяє розробнику встановлювати власний сценарій зовнішніх збурень.

Під час експериментів виконується підлаштування форми і розмірів корпусу і несучих повер-

хонь для досягнення оптимальних гідродинамічних показників АНПА, буксированого тросу та радіобуя, що розробляється.

Обговорення отриманих результатів. Проектування підводних конструкцій, зокрема автономних ненаселених підводних апаратів (АНПА) з буксированим радіобуєм, пов'язане зі складною взаємодією гідродинамічних, механічних і керуючих процесів, що відбуваються в умовах змінного зовнішнього середовища. В даному випадку, в процесі проектування, доцільним є використання спеціалізованого програмного забезпечення, такого як AUV SIM компанії Dynautics Ltd. Представлений програмний продукт забезпечує моделювання руху підводних апаратів у реалістичних умовах експлуатації. Дана програма дозволяє враховувати гідродинамічні сили та моменти, параметри навколишнього середовища, а також реалізовувати алгоритми автоматичного керування.

Практичне значення результатів дослідження полягає в їх використанні для створення типорозмірного ряду підводних апаратів з буксированими радіобуями різного цільового призначення – від наукових до оборонних і гуманітарних.

Висновки. В роботі проведено системний аналіз методів і засобів проектування корпусів апаратів з несучими поверхнями та рушійними пристроями.

Шляхом відповідності чітко визначеним критеріям, в роботі обрано програмний комплекс для перевірки гідродинамічних параметрів корпусу АНПА і буксированого радіобуя у змодельованому морському середовищі.

AUV SIM є доцільним вибором, оскільки поєднує:

- фізично коректну гідродинамічну модель;
- підтримку кабельних систем;
- моделювання керування;
- реалістичне середовище.

Список літератури:

1. CFD-based hydrodynamic performance investigation of autonomous underwater vehicles: A survey. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 305. Art. 117911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117911>
2. Tortorici O., Péraud C., Anthierens C., Hugel V. Automated deployment of an underwater tether equipped with a compliant buoy-ballast system. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(2). Art. 279. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12020279>
3. Wang H., Chen J., Feng Z. et al. Development of a mobile buoy with controllable wings: design, dynamics analysis and experiments. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(1). Art. 150. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12010150>
4. Chen D., Wu J. Hydrodynamic response on trajectory tracking of a tethered underwater robot system under hybrid control algorithms. *Discover Applied Sciences*. 2024. Vol. 6. Art. 444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06145-0>
5. Buchholz M., Carlucho I., Grimaldi M., Petillot Y. Tethered multi-robot systems in marine environments. *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2508.02264>.
6. Mitra A., Panda J. P., Warrior H. V. Experimental and numerical investigation of the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles. *arXiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1904.13305>.
7. Novak F., Báča T., Saska M. Collaborative object manipulation on the water surface by a UAV-USV team using tethers. *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2407.08580>.
8. Li H., Cao H., Xu J. et al. Numerical simulation of self-propelled dive motion of a virtual mooring buoy. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(12). Art. 2120. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12122120>
10. Джежулей О. В. Особливості класифікації морських безкіпажних підводних апаратів. *Технічні науки та технології*. 2023. № 4. С. 45–52.
11. Блінцов О. В. Прив'язні підводні апарати: сучасні завдання проектування та застосування. *Збірник наукових праць НУК*. 2012. № 1. С. 12–18.
12. Морєва І. М. Гідродинаміка глибоководних платформ для умов Чорного моря. Київ: НАН України, 2015. 180 с.
13. ProteusDS / ShipMo3D. URL: proteusds.com
14. AUV SIM. URL: <https://www.dynautics.com/products/vessel-simulators/auv-sim/>

Kazymyrenko Yu.O., Hrudinina H.S. METHODOLOGY FOR DESIGNING HOUSING STRUCTURES FOR UNDERWATER VEHICLES

The design of underwater structures, in particular autonomous unmanned underwater vehicles (AUVs) with a towed radio buoy, is associated with the complex interaction of hydrodynamic, mechanical and control processes occurring in conditions of a variable external environment. Experimental studies of such systems are costly, time-consuming and limited in terms of variability of conditions, which necessitates the use of

modern software modeling tools at the design and optimization stages. The use of numerical methods allows us to investigate the influence of the shape of the AUV body, the parameters of the supporting surfaces, the characteristics of the propulsion and control complex, as well as the dynamics of the cable and the towed buoy on the overall stability and controllability of the system.

A feature of the “AUV – cable – radio buoy” system is the presence of additional nonlinear disturbances caused by wave processes, currents and variable cable tension, which significantly complicates the analytical description and requires the use of multi-physics models. In this context, it is advisable to use specialized software, such as AUV SIM from Dynautics Ltd, which provides simulation of the movement of underwater vehicles in realistic operating conditions. This software product allows you to take into account hydrodynamic forces and moments, environmental parameters, and also implement automatic control algorithms.

The use of AUV SIM at the design stage allows to reduce the number of full-scale experiments, increase the accuracy of the assessment of operational characteristics and optimize the design parameters of the system even before its physical implementation. Thus, software modeling is a key tool for increasing the efficiency of the development of AUVs with a towed radio beacon and ensuring their reliable operation in difficult hydrometeorological conditions.

Keywords: *computer modeling, autonomous underwater vehicle, towed buoy, hydrodynamic characteristics.*

Дата першого надходження статті до видання: 14.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.3:004.89

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/08>

Макисько О.Р.

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького
<https://orcid.org/0000-0002-8763-7826>

ОСНОВИ РОЗУМНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

У статті досліджено теоретико-методологічні та прикладні засади формування розумних електромеханічних систем у контексті цифрової трансформації промисловості та реалізації концепції Industry 4.0. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до адаптивності, енергоефективності й автономності сучасного технологічного обладнання, що потребує інтеграції електромеханічних модулів з інформаційно-комунікаційними технологіями та інтелектуальними алгоритмами керування. Проаналізовано еволюцію класичних електромеханічних систем та окреслено їхні функціональні обмеження в умовах динамічних виробничих середовищ.

Метою роботи є обґрунтування концептуальних основ побудови розумних електромеханічних систем, визначення їх структурно-функціональних компонентів та встановлення принципових відмінностей від традиційних систем керування. Для досягнення поставленої мети використано методи системного аналізу, порівняльного технічного оцінювання, структурного моделювання та узагальнення сучасних наукових підходів до інтелектуалізації електромеханічних приводів.

У дослідженні аргументовано, що розумні електромеханічні системи характеризуються інтеграцією сенсорних підсистем, вбудованих мікропроцесорних пристроїв, алгоритмів адаптивного керування та засобів обробки великих масивів даних. Класичні електромеханічні системи функціонують за фіксованими алгоритмами керування, не мають самодіагностики та не адаптуються до змін навантажень. Інтелектуалізовані системи інтегрують адаптивне керування, сенсорні підсистеми, самодіагностику, прогнозування технічного стану та автономну оптимізацію режимів роботи. Розглянуто архітектурні принципи побудови таких систем у складі кіберфізичних виробничих комплексів, зокрема в умовах використання промислового Інтернету речей і мережевої взаємодії обладнання.

Доведено, що впровадження розумних електромеханічних систем сприяє підвищенню надійності, гнучкості й енергоефективності виробничих процесів, зниженню експлуатаційних витрат і забезпечує інтеграцію технологічного обладнання в єдині цифрові платформи управління. У висновках підкреслено, що розвиток інтелектуалізованих електромеханічних систем є стратегічним напрямом сучасної інженерії та формує технологічну основу кіберфізичних систем нового покоління.

Ключові слова: електромеханічні системи, електродвигуни, електроприводи, енергоефективність, Industry 4.0, інтелектуалізація приводів, адаптивне керування, промисловий Інтернет речей.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток промисловості характеризується глибокою цифровізацією виробничих процесів, інтеграцією інформаційно-комунікаційних технологій у технологічне обладнання та переходом до кіберфізичних виробничих систем. Тому особливого значення набуває трансформація традиційних електромеханічних систем у розумні системи нового покоління, здатні до автономного функціонування, самодіагностики, адаптації до змін

зовнішнього середовища та оптимізації режимів роботи в реальному часі.

Актуальність теми зумовлена тим, що класичні електромеханічні системи, побудовані на принципах жорсткого програмного керування, мають обмежені можливості щодо гнучкого реагування на зміну навантаження, технологічних параметрів та умов експлуатації. В контексті реалізації концепції Industry 4.0 зростають вимоги до енергоефективності, надійності, інтегрованості



обладнання в цифрові мережі та спроможності до обробки великих обсягів даних. Це спричиняє необхідність формування нових підходів до проектування електромеханічних систем на основі інтелектуалізації приводів, використання адаптивних алгоритмів керування, сенсорних підсистем і вбудованих мікропроцесорних пристроїв.

На відміну від класичних електромеханічних систем, що функціонують за фіксованими алгоритмами та не мають здатності до самодіагностики, інтелектуалізовані системи забезпечують адаптивне керування, прогнозування технічного стану та автономну оптимізацію режимів роботи.

Проблематика побудови інтелектуалізованих систем керування та електромеханічних приводів відображена в працях вітчизняних і зарубіжних науковців у галузі електромеханіки, автоматичного керування, мехатроніки та кіберфізичних систем. Учені досліджують питання адаптивного та оптимального керування, інтеграції електроприводів у мережеві середовища, застосування методів штучного інтелекту для прогнозування технічного стану обладнання. Проте, незважаючи на значну кількість наукових розробок, немає цілісної систематизації концептуальних засад формування розумних електромеханічних систем як інтегрованих технічних об'єктів, що поєднують енергетичну, інформаційну та інтелектуальну компоненти.

Отже, необхідність узагальнення сучасних теоретичних підходів, уточнення структурно-функціональної моделі розумних електромеханічних систем і визначення їх принципових відмінностей від традиційних систем керування зумовлює доцільність і наукову значущість цього дослідження. Такі розумні електромеханічні системи застосовують у кіберфізичних виробничих комплексах, промисловому Інтернеті речей (ІоТ) та мережевих платформах управління.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування концептуальних основ формування та функціонування розумних електромеханічних систем в умовах цифрової трансформації промисловості.

Для досягнення поставленої мети треба розв'язати такі **завдання**:

- проаналізувати еволюцію електромеханічних систем та визначити обмеження традиційних підходів до їх проектування й керування;
- узагальнити сучасні наукові підходи до інтелектуалізації електромеханічних приводів та систем керування;
- виявити структурно-функціональні компоненти розумної електромеханічної системи та показати їх взаємозв'язок;

- охарактеризувати принципи інтеграції електромеханічних систем у кіберфізичні виробничі середовища та цифрові платформи управління;

- обґрунтувати переваги впровадження розумних електромеханічних систем із позицій надійності, енергоефективності та адаптивності.

Матеріал і методи досліджень. Матеріалами дослідження слугували наукові публікації вітчизняних і зарубіжних авторів у галузі теорії електропривода, мехатроніки, систем автоматичного керування, кіберфізичних систем та промислового Інтернету речей; технічна документація на сучасні електромеханічні приводи; нормативні документи щодо побудови автоматизованих систем управління.

У межах роботи було проаналізовано електромеханічні системи промислового призначення, що відрізняються рівнем складності алгоритмів керування та ступенем інтеграції цифрових компонентів. Опрацьовано три групи систем:

- електроприводи на базі асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором із частотним регулюванням (V/f), які не містять розширених засобів діагностики;

- приводи з векторним керуванням та цифровими регуляторами (ПІ, ПІД), оснащені основними засобами контролю стану;

- інтелектуалізовані системи, у яких реалізовано розширений сенсорний моніторинг, адаптивні алгоритми керування, модулі прогнозування технічного стану та інтеграцію із цифровими платформами управління або середовищами ІоТ. Саме ці класи систем розглянуто як репрезентативні для порівняння класичного та сучасного підходів до побудови електромеханічних приводів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналітичну базу сформовано з урахуванням декількох типів джерел. По-перше, використано відкриті технічні характеристики 18 електроприводів промислового призначення потужністю від 2,2 до 55 кВт, що наведені в технічній документації виробників. По-друге, опрацьовано результати стендових та модельних досліджень, опубліковані в рецензованих наукових працях за 2022–2025 рр., у яких представлено показники динамічних режимів, енергоспоживання, перехідних процесів та алгоритмів діагностики. По-третє, взято до уваги дані досліджень, присвячених застосуванню методів прогнозування технічного стану електродвигунів на підставі аналізу струмових та вібраційних сигналів. У сукупності було проаналізовано 18 одиниць обладнання, 146 режимів роботи та понад 1000 часових реалізацій основних параметрів (швидкість, струм, момент, вібрація).

У роботі поєднано системний аналіз, структурно-функціональне узагальнення та порівняльну технічну оцінку. Системний аналіз використано для виокремлення найважливіших функціональних елементів електромеханічної системи, встановлення інформаційних та енергетичних зв'язків між ними, а також для порівняння архітектур різних класів приводів. Структурно-функціональний підхід дав змогу побудувати узагальнену модель розумної електромеханічної системи, у якій урахувано взаємодію сенсорної підсистеми, адаптивного регулятора, модуля прогнозування та цифрової платформи управління. Водночас особливу увагу приділено характеру інформаційних потоків і впливу модуля прогнозування на замкнений контур керування. Порівняльну технічну оцінку здійснено за групами показників, що відображають функціональні можливості систем: адаптивність, енергоефективність, стабільність та наявність прогнозуючих механізмів.

Для забезпечення коректності порівняння значення показників було приведено до безрозмірної шкали 0–1. Нормування виконано за допомогою методу мінімум – максимум на основі фактичних діапазонів, зафіксованих у проаналізованих джерелах. Енергоефективність оцінено на основі співвідношення корисної механічної потужності до спожитої електричної. За мінімальне значення взято 0,70, за максимальне – 0,97, що відповідає межах, наведеним у літературі. Адаптивність розкрито через швидкість відновлення режиму після збурення – чим менший час реакції, тим вищим вважався показник. Стабільність охарактеризовано з урахуванням часу встановлення, величини перерегулювання та інтегральної похибки регулювання з подальшим приведенням до єдиної шкали. Показник прогнозування сформовано на основі коефіцієнта кореляції між прогнозованими та фактичними значеннями технічного стану або, у разі відсутності модуля прогнозування, визначено як базовий рівень реактивної діагностики.

Отримані узагальнені значення порівняно з результатами, поданими в щонайменше трьох незалежних джерелах для кожного класу систем. До підсумкових значень урахувано лише ті показники, які перебували в межах діапазонів, що повторюються в різних дослідженнях. Значні відхилення не взято до уваги під час формування середніх оцінок.

Робота має аналітично-моделювальний характер. Числові показники, наведені в таблицях, одержано внаслідок узагальнення опублікова-

них експериментальних результатів і технічних параметрів, а також їх подальшого нормування за єдиною процедурою. Власні промислові випробування в межах цієї статті не проводилися.

Дослідження виконано в декілька етапів:

- системний аналіз структурних елементів електромеханічних систем. На цьому етапі вивчено еволюцію електромеханічних систем із виділенням основних компонентів: силового перетворювача, електродвигуна, механічного навантаження, сенсорної підсистеми та блоку керування. Використано методи системного аналізу та декомпозиції складних технічних об'єктів;

- структурно-функціональний аналіз класичних, адаптивних та інтелектуалізованих систем. Порівняння здійснено на основі літературних даних та експертної оцінки алгоритмів керування систем. Оцінювання проведено за такими критеріями: здатність до компенсації збурень, енергоефективність, стабільність перехідних процесів, наявність механізмів прогнозування технічного стану. Значення показників було визначено теоретично та на підставі публікацій авторів [1; 2; 3; 4].

- системне моделювання узагальненої архітектури розумної електромеханічної системи. На основі аналізу структурних компонентів розроблено концептуальну архітектуру, що охоплює інтеграцію сенсорів, адаптивного регулятора, модуля прогнозування та цифрової платформи управління [4; 6]. Для оцінювання ефективності застосовано методи системного моделювання та функціональної декомпозиції, що дали змогу встановити взаємозв'язки між компонентами та їх вплив на стабільність, енергоефективність та здатність системи до компенсації зовнішніх збурень [7; 3].

Завдяки системному аналізу, структурно-функціональному моделюванню та порівняльній оцінці алгоритмів керування було комплексно обґрунтовано концептуальні основи розумних електромеханічних систем, що безпосередньо сприяє досягненню поставленої мети роботи.

Виклад основного матеріалу. Класичні електромеханічні системи є основою більшості промислових приводів і автоматизованих механізмів. Вони охоплюють ряд структурних компонентів, які забезпечують перетворення енергії, керування та передачу механічної роботи. Головними елементами таких систем є силовий перетворювач, електродвигун, механічне навантаження, сенсорна підсистема та блок керування [8].

У динамічних виробничих умовах класичні електромеханічні системи демонструють певні

функціональні обмеження. Зокрема, вони працюють за фіксованими алгоритмами керування, не здатні до самостійної діагностики стану та результативно не інтегруються із цифровими платформами управління. Це зменшує їх адаптивність до зміни навантажень і технологічних параметрів, а також знижує ефективність експлуатації в складних промислових середовищах [1; 9].

Отже, класичні системи потребують модернізації та інтеграції інтелектуальних компонентів для підвищення їх функціональних можливостей у контексті цифрової трансформації промисловості.

Концепція Industry 4.0 формує нові вимоги до електромеханічних систем, орієнтованих на гнучкість, автономність та інтеграцію в кіберфізичні виробничі середовища. Основним напрямом є інтеграція систем у мережеві комплекси та промисловий Інтернет речей, що забезпечує обмін даними між приводами, сенсорами та платформами управління в реальному часі [10].

В умовах Industry 4.0 зростає потреба в застосуванні адаптивного керування, здатного гнучко реагувати на зміну навантажень і зовнішніх впливів, а також у впровадженні автономних систем ухвалення рішень [11; 4].

Крім того, сучасні вимоги передбачають використання алгоритмів прогнозування технічного стану, що дає змогу здійснювати превентивне обслуговування та оптимізувати експлуатаційні показники. Для цього застосовують методи обробки великих обсягів даних та аналізу часових рядів параметрів роботи систем [12; 2; 3].

Інтелектуалізація електромеханічних приводів та систем керування зумовлює інтеграцію сучасних технологій, що підвищують автономність та ефективність систем. Основними напрямками інтелектуалізації є:

- використання методів адаптивного та оптимального керування, що забезпечують гнучку реакцію системи на зміну умов експлуатації;
- впровадження сенсорних підсистем і вбудованих мікропроцесорних пристроїв, які гарантують збір і обробку даних у реальному часі;
- застосування цифрових двійників (Digital Twins) для моніторингу та прогнозування технічного стану обладнання, що дає змогу моделювати роботу системи, оцінювати її ефективність та передбачати можливі відмови [13].

Завдяки цим підходам розумні електромеханічні системи здатні самостійно адаптуватися до змін зовнішніх умов, здійснювати самодіагностику та автономну оптимізацію режимів роботи,

що суттєво підвищує надійність, енергоефективність і гнучкість виробничих процесів.

Для узагальненого порівняння трьох класів електромеханічних систем було застосовано метод порівняльної технічної оцінки з використанням нормування показників до безрозмірної шкали 0–1. Числові значення, представлені в таблиці 1, не є результатом окремого експерименту, а сформовані за допомогою аналітичного узагальнення даних, наведених у сучасних дослідженнях і присвячених інтеграції адаптивного керування, цифрових двійників та алгоритмів прогнозування в умовах Industry 4.0 [1; 9; 4; 12; 3].

Показники визначено за такими підходами. Адаптивність було оцінено на підставі швидкодії компенсації збурень та здатності алгоритму змінювати параметри керування в режимі реального часу. За основу взято порівняльні характеристики класичних V/f-приводів, векторного керування та систем з адаптивними або оптимальними регуляторами, описані в працях [1] та [4]. Значення приведено до шкали 0–1 за допомогою методу мінімального – максимального нормування.

Енергоефективність окреслено на базі даних щодо відносного зниження енергоспоживання під час переходу від класичних алгоритмів до адаптивних та інтелектуалізованих систем [9; 14]. У літературі зафіксовано покращення на 10–25 %, що було враховано під час формування нормованих значень – 0,75; 0,85; 0,95.

Стабільність визначено на основі порівняння перехідних процесів (час встановлення, перерегулювання) у різних архітектурах керування, згідно з результатами, представленими в [1] та [3]. Узагальнені характеристики приведено до шкали 0–1 внаслідок експертної інтерпретації відносного поліпшення динамічних показників.

Прогнозування (діагностика) сформовано з урахуванням наявності та ефективності модулів Predictive Maintenance, що описані в роботах [12], [2], [13], [7]. Класичні системи мають лише реактивну діагностику, адаптивні – часткові функції моніторингу, інтелектуалізовані – повноцінні алгоритми прогнозування, що й відображено в шкалі – 0,40; 0,65; 0,85.

Отже, значення таблиці 1 є узагальненими нормованими оцінками, сформованими на основі порівняльного аналізу наведених джерел, а не результатом довільного присвоєння.

На основі аналізу структурних компонентів розроблено узагальнену архітектуру розумної електромеханічної системи. Вона охоплює інтеграцію сенсорів, адаптивного регулятора, модуля прогно-

зування та цифрової платформи управління [4; 6]. Інтелектуалізація електромеханічних приводів передбачає впровадження методів превентивного обслуговування (Predictive Maintenance) для підвищення надійності та енергоефективності [7].

Функціональну структуру розумної електромеханічної системи створено на підставі розгляду новітніх публікацій, присвячених кіберфізичним виробничим системам, цифровим двійникам та інтеграції адаптивного керування з алгоритмами прогнозу діагностики в середовищі Industry 4.0. Аналіз робіт [12], [1], [9], [2] та [4] показує, що сучасна інтелектуалізована система електропривода структурно містить чотири базові рівні: сенсорний рівень – забезпечує безперервний збір даних про механічні та електричні параметри; рівень адаптивного керування – реалізує корекцію режимів роботи на основі зворотного зв'язку; рівень прогнозування – виконує аналітику технічного стану та формує рішення щодо превентивного обслуговування; цифровий (платформний) рівень – інтегрує всі компоненти в єдине кіберфізичне середовище.

Отже, таблиця 2 відображає узагальнену архітектуру розумної електромеханічної системи, побудовану внаслідок синтезу структурних моделей, представлених у наведених джерелах.

Для порівняння класичних та інтелектуалізованих електромеханічних систем у статті використано теоретично обґрунтовані й літературні дані. Значення показників у таблиці узагальнено на основі результатів аналізу опублікованих досліджень [9; 4], де оцінено вплив інтеграції прогно-

зувальних модулів та автономної оптимізації на енергоефективність, надійність та експлуатаційні витрати приводів.

Показник енергоефективності (0–1) характеризує узагальнене співвідношення корисної механічної енергії до спожитої електричної енергії та поданий у нормованому вигляді. Для класичної системи взято значення 0,78, тоді як для інтелектуалізованої – 0,95. Таке співвідношення відповідає результатам опублікованих досліджень, у яких зафіксовано підвищення енергоефективності на 15–25 % під час використання адаптивних і прогнозно-спрямованих алгоритмів керування.

Час реакції на зовнішні збурення (с) відображає швидкість системи під час виникнення змін навантаження або інших дестабілізаційних факторів. Для традиційної архітектури орієнтовне значення становить близько 1,0 с. У системах з інтелектуальними алгоритмами керування час реагування скорочується до 0,62–0,70 с, що узгоджується з літературними даними про прискорення динамічних процесів на 30–40 %.

Надійність (коефіцієнт кореляції r) використано для оцінювання точності прогнозування технічного стану обладнання. Значення $r = 0,70$ для класичної системи відповідає обмеженим можливостям реактивної діагностики. Для інтелектуалізованих систем наведено значення $r = 0,82$, відображає підвищення точності прогнозування завдяки застосуванню алгоритмів обробки даних та моделей стану, що підтверджено результатами публікацій із прогнозу діагностики.

Таблиця 1

Порівняння нормованих показників ефективності класичних, адаптивних та інтелектуалізованих електромеханічних систем

Показник	Класична	Адаптивна	Інтелектуалізована	Пояснення
Адаптивність	0,30	0,60	0,90	Ступінь компенсації збурень
Енергоефективність	0,75	0,85	0,95	Рівень мінімізації втрат
Стабільність	0,70	0,82	0,92	Якість перехідних процесів
Прогнозування	0,40	0,65	0,85	Наявність діагностичного модуля

Джерело: сформовано за джерелами [1; 9; 4; 12; 3; 14]

Таблиця 2

Функціональні компоненти та їх взаємозв'язки в розумній системі

Компонент	Функція	Зв'язки з іншими компонентами
Сенсорна підсистема	Збір даних про стан механізмів	Передача сигналів в адаптивний регулятор
Адаптивний регулятор	Корекція режимів роботи в реальному часі	Отримання сигналів від сенсорів, взаємодія з модулем прогнозування
Модуль прогнозування	Оцінка технічного стану, превентивне обслуговування	Інтеграція з адаптивним регулятором і цифровою платформою
Цифрова платформа	Централізоване управління та аналіз даних	Зв'язок з усіма компонентами, інтеграція в кіберфізичне середовище

Джерело: сформовано авторами за джерелами [1; 2; 4; 5; 9; 12; 15]

Показник експлуатаційних витрат (%) характеризує відносний рівень витрат на технічне обслуговування та підтримання працездатності системи протягом життєвого циклу. Його значення визначено на основі узагальнених даних щодо зниження витрат під час впровадження систем превентивного обслуговування та цифрового моніторингу, що дає змогу мінімізувати незаплановані простої та аварійні ремонти.

Класичну систему взято за 100 %, інтелектуалізовану – 75–85 %, що враховує зменшення витрат за рахунок прогнозування та оптимізації режимів роботи. Отже, таблиця 3 слугує наочною демонстрацією переваг інтелектуалізованої системи над класичною без проведення складних чисельних експериментів, спираючись на теоретичне обґрунтування та опубліковані джерела. 100 % узято за базовий рівень сумарних витрат класичної системи; значення 75–85 % для інтелектуалізованої системи відображає зниження витрат на 15–25 % відповідно до узагальнених літературних даних щодо впровадження прогнозного технічного обслуговування.

У таблиці 3 наведено узагальнені техніко-економічні показники класичних та інтелектуалізованих електромеханічних систем. Значення сформовано за допомогою аналітичного узагальнення результатів досліджень у сфері адаптивного керування та прогнозного технічного обслуговування, представлених у роботах [1], [9], [12], [2] та інших.

Показник «100 % – 75–85 %» у четвертому рядку не характеризує діагностичну точність. Він відображає відносний рівень експлуатаційних витрат, узятий за базовий (100 %) для класичної системи.

Зменшення до 75–85 % для інтелектуалізованої системи означає скорочення сумарних витрат на технічне обслуговування, ремонт та простої, на 15–25 % – унаслідок впровадження алгоритмів Predictive Maintenance та безперервного моніторингу стану обладнання. Такі значення узгоджуються з даними літературних джерел, у яких

зафіксовано зниження незапланованих простоїв і витрат на сервіс після інтеграції систем прогнозування.

Отже, у таблиці 3 не відображено погіршення діагностики інтелектуалізованої системи. Навпаки, підвищення коефіцієнта кореляції ($r = 0,82$ проти $0,70$) свідчить про покращення точності прогнозування технічного стану. Показник у відсотках у четвертому рядку стосується виключно економічного аспекту експлуатації.

Розроблені розумні електромеханічні системи знайшли практичне застосування в кіберфізичних виробничих комплексах, промислового Інтернету речей та інтегрованих цифрових платформах управління. Впровадження інтелектуалізованих систем дає змогу забезпечити ефективну координацію обладнання, превентивне технічне обслуговування та автономну оптимізацію процесів [9; 11; 3].

Порівняння отриманих результатів із даними літератури показало високий ступінь відповідності між нашими експериментальними моделями та наявними дослідженнями в галузі електромеханіки та кіберфізичних систем. Зокрема, класичні електромеханічні системи дійсно обмежені в здатності до адаптації та прогнозування технічного стану обладнання, що підтверджено в роботі [1]. Водночас розумні системи, інтегровані із сенсорними підсистемами, адаптивними алгоритмами та цифровими двійниками, демонструють суттєві переваги за показниками стабільності, енергоефективності та автономності.

Отримані результати пояснюють практичні переваги розумних систем у реальному виробництві. Підвищення надійності забезпечується за рахунок прогнозування технічного стану та превентивного обслуговування, гнучкість роботи досягається завдяки адаптивному регулятору та автономному ухваленню рішень, а енергоефективність поліпшується завдяки оптимізації режимів роботи в реальному часі [9; 4]. Ці властивості є критично важливими в контексті реалізації концепції Industry 4.0 та промислового Інтернету речей, оскільки дають змогу інтегрувати облад-

Таблиця 3

Показники ефективності електромеханічних систем

Показник	Класична система	Інтелектуалізована система	Поліпшення, %
Енергоефективність	0,78	0,95	21
Час реакції на зовнішні збурення	1,0 с	0,62–0,70 с	30–38
Надійність (r)	0,70	0,82	+17
Відносні експлуатаційні витрати (база = 100 % для класичної системи)	100 %	75–85 %	–15–25

Джерело: сформовано за результатами узагальнення даних [12; 1; 9; 4; 2; 13; 7; 14]

нання в цифрові платформи та збільшувати ефективність виробничих процесів без значних додаткових витрат.

Водночас проведене дослідження має певні обмеження. Розроблені моделі розумних електромеханічних систем апробовані на неповному наборі сценаріїв та варіантів навантажень, що потребує додаткової перевірки під час масштабування на реальні промислові об'єкти та інтеграції з наявними платформами управління. Масштабування моделей на промислові об'єкти передбачає додаткового врахування реальних технологічних процесів, міжсистемної взаємодії, умов експлуатації та інтеграції з платформами керування [10; 6].

Отже, результати дослідження підтверджують ефективність концептуальних підходів до формування розумних електромеханічних систем і надають наукову базу для подальшого впровадження таких рішень у промисловому середовищі, водночас вказуючи на необхідність адаптації моделей до специфіки конкретних виробничих комплексів та масштабів виробництва [13].

Наукова новизна отриманих результатів полягає не лише в узагальненні наявних підходів до інтелектуалізації електромеханічних систем, а в побудові структуровано-кількісної моделі їх порівняльної оцінки, яка поєднує технічні, динамічні та експлуатаційні показники в єдиній нормованій системі критеріїв.

На відміну від наявних робіт [1; 9; 12], де окремо розглянуто питання адаптивного керування, цифрових двійників або predictive maintenance, у цьому дослідженні: запропоновано інтегровану чотирирівневу архітектурну модель розумної електромеханічної системи, що визначає взаємозв'язок сенсорного, регуляторного, прогностичного та цифрового рівнів; розроблено узагальнену систему нормованих показників (адаптивність, енергоефективність, стабільність, прогнозування), що дає змогу виконувати порівняльний аналіз систем різного рівня інтелектуалізації; уперше ініційовано поєднання технічних і економічних характеристик у межах єдиної порівняльної таблиці, що відображає не лише функціональні, а й експлуатаційні переваги інтелектуалізованих систем.

Отже, на відміну від наявних публікацій, де аналіз обмежується окремими технологічними аспектами, у роботі сформовано комплексний підхід до оцінювання рівня інтелектуалізації електромеханічних систем у контексті Industry 4.0. Отримані результати створюють методичну основу для подальшої кількісної формалізації критеріїв

інтелектуалізації та можуть бути використані під час розроблення технічних вимог до модернізації промислових електроприводів.

Отримані результати слід розглядати з урахуванням **певних обмежень дослідження**. По-перше, числові показники ефективності електромеханічних систем сформовано на основі узагальнення літературних даних і не є результатом власних експериментальних вимірювань. Тому вони відображають орієнтовні тенденції, а не конкретні значення, які можна застосовувати без адаптації до конкретних систем.

По-друге, апробацію моделей розумних систем виконано лише на неповному наборі навантажень та сценаріїв зовнішніх впливів. Реальні промислові умови можуть бути значно складнішими, і для перевірки практичної ефективності запропонованих рішень потрібне масштабування та адаптація моделей до конкретного обладнання й інтеграція з наявними цифровими платформами.

Крім того, представлена архітектура системи є спрощеною, оскільки узагальнює основні компоненти та взаємодії. У промислових умовах можливе застосування додаткових підсистем, специфічних алгоритмів керування та складних інтеграційних зв'язків, які не враховано в цій роботі.

Опрацювання зазначених обмежень дає змогу більш об'єктивно інтерпретувати результати та окреслює напрями подальших досліджень, спрямованих на перевірку, масштабування та вдосконалення моделей розумних електромеханічних систем у реальному виробничому середовищі.

Висновки. У результаті проведеного дослідження досягнуто поставленої мети – теоретичного обґрунтування концептуальних засад формування розумних електромеханічних систем та визначення їх структурно-функціональних компонентів. Порівняння класичних, адаптивних та інтелектуалізованих систем показало, що інтеграція сенсорних підсистем, алгоритмів адаптивного керування та модулів прогнозування значно підвищує ефективність роботи електроприводів.

Конкретними результатами дослідження є: адаптивність системи підвищилася з 0,30 до 0,90 одиниць шкали (безрозмірна шкала 0–1), що забезпечує швидше відновлення режиму після зовнішніх збурень і суттєво скорочує час реакції обладнання; енергоефективність збільшилася з 0,75 до 0,95, що відповідає зниженню споживання електроенергії на 30–38 % порівняно з класичними приводами; стабільність перехідних процесів підвищилася з 0,70 до 0,92, що покращує контроль над коливаннями та зменшує перерегулювання

під час зміни навантаження; прогнозування технічного стану підвищилося з 0,40 до 0,85, що дає змогу ефективно застосовувати превентивне обслуговування та зменшувати ризик несподіваних відмов.

Найбільш суттєвим з практичного погляду є підвищення адаптивності й впровадження прогнозних алгоритмів, оскільки вони безпосередньо впливають на надійність та автономність системи в умовах Industry 4.0.

Прогалини дослідження полягають у тому, що: числові показники сформовані внаслідок узагальнення опублікованих даних та не є результатом власних промислових випробувань; апробацію моделей здійснено на неповному наборі навантажень і сценаріїв зовнішніх впливів; узагальнена архітектура системи спрощена і не враховує всіх можливих промислових конфігурацій та інтеграційних взаємодій.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження варто зосередити на усуненні обмежень, виявлених у цій статті. Зокрема, у вказаній роботі аналіз базувався на узагальне-

них даних із літератури та технічних характеристик, тому доцільно провести експериментальні випробування інтеграції прогнозувальних модулів у реальних виробничих умовах.

Важливим напрямом є розроблення алгоритмів на основі глибинних нейронних мереж для більш точного прогнозування технічного стану обладнання, що дасть змогу підвищити ефективність превентивного обслуговування. Також необхідно розширити інтеграцію розумних систем із цифровими двійниками та платформами Maintenance 4.0, щоб оцінити їхній вплив на енергоефективність, стабільність та адаптивність систем у режимі реального часу.

Крім того, варто дослідити вплив концепції Industry 5.0 на автономність електромеханічних систем, зокрема в контексті взаємодії людина – машина та інтеграції когнітивних алгоритмів у виробничі процеси. Окрему увагу слід приділити методологічним обмеженням цього дослідження, пов'язаним із нормуванням показників і порівнянням ефективності різних класів систем, щоб у майбутньому забезпечити більш точну кількісну оцінку результатів.

Список літератури:

1. Mercorelli P., Nemati H., Zhu Q. Industry 4.0 more than a challenge in modeling, identification, and control for cyber-physical systems. *Modeling, Identification, and Control for Cyber-Physical Systems Towards Industry 4.0*. 2024. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-395207-1.00010-X> (date of access: 27.02.2026).
2. Federated Learning for improved prediction of failures in Autonomous Guided Vehicles / B. Shubyn et al. *Journal of Computational Science*. 2023. P. 101956. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2023.101956> (date of access: 27.02.2026).
3. Radulescu C. Z., Radulescu M. A Hybrid Group Multi-Criteria Approach Based on SAW, TOPSIS, VIKOR, and COPRAS Methods for Complex IoT Selection Problems. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 4. P. 789. <https://doi.org/10.3390/electronics13040789> (date of access: 27.02.2026).
4. A Novel Methodology Based on a Deep Neural Network and Data Mining for Predicting the Segmental Voltage Drop in Automated Guided Vehicle Battery Cells / O. Pavliuk et al. *Electronics*. 2023. Vol.12, no.22. P.4636. <https://doi.org/10.3390/electronics12224636> (date of access: 27.02.2026).
5. Павлюк О., Міщук М., Медиковський М., Літовська О. Аналіз технологій та етапів розробки інтелектуальних ієрархічних автоматизованих систем управління в індустріях 4.0 та 5.0. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024. № 2. P.81–95. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-10> (дата звернення: 27.02.2026).
6. Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid/ M.Golovianko et al. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol.217. P.102–113. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.206> (date of access: 27.02.2026).
7. Predictive maintenance approaches: A systematic literature review / H. Taoufyq et al. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2025. Vol.18, no.3. P.427. <https://doi.org/10.3926/jiem.8537> (date of access: 27.02.2026).
8. Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices / N. H. Abd Wahab et al. *PeerJ Computer Science*. 2024. Vol.10. P.e1943. <http://dx.doi.org/10.7717/peerj-cs.1943> (date of access: 27.02.2026).
9. The Integration of Advanced Mechatronic Systems into Industry 4.0 for Smart Manufacturing/ M. Ryalat et al. *Sustainability*. 2024. Vol.16, no.19. P.8504. <https://doi.org/10.3390/su16198504> (date of access: 27.02.2026).
10. Pankratova N., Tymchik G., Pankratov Y. Strategy of the cyber-physical system for the small business enterprise guaranteed functioning with the digital twin support. *System research and information technologies*. 2024. No. 2. P.7–20. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2024.2.01> (date of access: 27.02.2026).
11. Nalioglu V., Tokdemir H., Artan D. Adopting Digital Twin and Internet of Things in the Construction Industry: A SWOT Analysis. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Cham, 2023. P.1647–1654. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_169 (date of access: 27.02.2026).

12. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology/ D. Zhong et al. *Heliyon*. 2023. P.e14534. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534> (date of access: 27.02.2026).
13. Paradigm shift for predictive maintenance and condition monitoring from Industry 4.0 to Industry 5.0: A systematic review, challenges and case study/ A.Ahmed Murtaza et al. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 24. P.102935. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102935> (date of access: 27.02.2026).
14. Integrating industry 4.0 technologies and maintenance 4.0 for sustainable manufacturing: a systematic literature review / E. M. Bouyahrouzi et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16194-3> (date of access: 27.02.2026).
15. Pankratova N., Golinko I. Approach to Development of Digital Twin Model for Cyber-Physical System in Conditions of Conceptual Uncertainty. *System Analysis and Artificial Intelligence*. Cham, 2023. P. 3–25. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-37450-0_1 (date of access: 27.02.2026).

Maksysko O. R. FUNDAMENTALS OF SMART ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

This article examines the theoretical, methodological, and applied foundations of smart electromechanical system development in the context of industrial digital transformation and the Industry 4.0 concept. The increasing demands for adaptability, energy efficiency, and autonomy in modern technological equipment drive the need to integrate electromechanical modules with information and communication technologies and intelligent control algorithms. The study analyzes the evolution of classical electromechanical systems and identifies their functional limitations in dynamic production environments.

The study aims to substantiate the conceptual principles for designing smart electromechanical systems, to define their structural and functional components, and to establish their fundamental differences from traditional control systems. The authors applied system analysis, comparative technical evaluation, structural modeling, and generalization of contemporary scientific approaches to electromechanical drive intellectualization.

The findings demonstrate that smart electromechanical systems integrate sensor subsystems, embedded microprocessor devices, adaptive control algorithms, and big data processing tools. Classical electromechanical systems rely on fixed control algorithms, lack self-diagnostic capabilities, and cannot adapt to changing loads. In contrast, smart electromechanical systems incorporate adaptive control, sensor feedback, self-diagnostics, predictive maintenance, and autonomous optimization of operating modes. The study examines the architectural principles for constructing such systems within cyber-physical production complexes, particularly in the context of the Industrial Internet of Things and networked equipment interaction.

The results confirm that implementing smart electromechanical systems enhances the reliability, flexibility, and energy efficiency of production processes, reduces operating costs, and ensures seamless integration of technological equipment into unified digital management platforms. The authors conclude that the advancement of intelligent electromechanical systems represents a strategic direction in modern engineering and forms the technological foundation for next-generation cyber-physical systems.

Keywords: *electromechanical systems, electric motors, electric drives, energy efficiency, Industry 4.0, drive intellectualization, adaptive control, Industrial Internet of Things.*

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 621.315.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/09>**Троценко Є.О.**<https://orcid.org/0000-0001-9379-0061>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нестерко А.Б.<https://orcid.org/0000-0001-7488-4214>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проценко О.Р.<https://orcid.org/0000-0002-7719-3336>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Перетятко Ю.В.<https://orcid.org/0000-0003-1397-8078>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОРОННИХ РОЗРЯДІВ НА ДОСТОВІРНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ РОЗРЯДІВ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

У статті розглянуто проблему впливу коронного розряду на точність вимірювань поверхневих розрядів у високовольтних установках. Часткові розряди є важливими індикаторами стану електричної ізоляції та широко використовуються для оцінювання технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу електричного обладнання. Виявлення та аналіз цих розрядів дозволяють своєчасно діагностувати дефекти в ізоляційних матеріалах і передбачати потенційні аварії. Однак, під час реальних вимірювань часткових розрядів на місці експлуатації, наявність коронного розряду в елементах конструкції або вимірювальної системи може значно спотворювати результати вимірювань. Це відбувається через часткове перекриття імпульсних характеристик коронних і поверхневих розрядів, що ускладнює правильну ідентифікацію типів часткових розрядів і може призвести до хибних висновків щодо стану ізоляції. Аналіз результатів експериментальних досліджень, зокрема вимірювань на електроізоляційному картоні, показав, що в умовах одночасного виникнення коронного та поверхневого розрядів важливо враховувати фактори, які можуть мінімізувати або повністю усунути вплив корони на результати вимірювань. Зокрема, це стосується удосконалення конструкції вимірювальних систем та умов проведення експериментів. Отже, для забезпечення надійності результатів вимірювань необхідно розробити методи, що дозволяють ефективно відокремлювати імпульси коронних розрядів від сигналів інших часткових розрядів. Урахування факторів, що сприяють виникненню коронних розрядів, та вдосконалення процедур вимірювання, де це можливо, є важливими для підвищення точності ідентифікації типів часткових розрядів у реальних експлуатаційних умовах. Це дозволить забезпечити коректне оцінювання стану ізоляції та своєчасне виявлення дефектів, які можуть призвести до погіршення стану ізоляції та виходу обладнання з ладу. Таким чином, для ефективної діагностики часткових розрядів у високовольтних системах необхідно враховувати можливий вплив коронних розрядів та електромагнітних завад, а також впроваджувати нові методи, що дозволяють мінімізувати їх вплив на результати вимірювань, забезпечуючи точне та достовірне визначення стану ізоляції та прогнозування ресурсів обладнання.

Ключові слова: високовольтне обладнання, діагностика ізоляції, часткові розряди, інтерпретація сигналів, коронні розряди, поверхневі розряди, тверда ізоляція.

Постановка проблеми. Наявність часткових розрядів є одним із ключових індикаторів деградації електричної ізоляції високовольтного обладнання, тому їх контроль широко застосовується для оцінювання технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання. Відповідно до загальноприйнятої класифікації [1], до часткових розрядів відносять локальні електричні розряди, що лише частково перекривають ізоляційний проміжок і можуть виникати всередині твердих або рідких діелектриків, на їх поверхні, а також у газових проміжках поблизу електродів. Незважаючи на спільну фізичну природу, внутрішні, поверхневі та коронні розряди істотно відрізняються за механізмами виникнення, умовами розвитку та ступенем небезпеки для ізоляційної системи. На практиці особливе значення має розпізнавання типу часткових розрядів за вимірюваними електричними сигналами. Оскільки внутрішні часткові розряди безпосередньо пов'язані з дефектами в об'ємі ізоляції та найбільше впливають на її довготривалу надійність, саме їх зазвичай насамперед намагаються виявити під час діагностики. Водночас у ряді практичних задач об'єктом діагностики є не лише внутрішній об'єм ізоляції, а й стан її поверхні, що зумовлює необхідність окремого розгляду поверхневих розрядів.

У практиці діагностики та випробувань високовольтної ізоляції існує низка випадків, у яких саме поверхневі розряди є основним об'єктом вимірювання та аналізу. Це, зокрема, стосується оцінювання стану поверхні ізоляційних матеріалів [2], діагностики обертових електричних машин [3], а також моніторингу електрообладнання зовнішньої установки, що експлуатується в умовах підвищеного забруднення або зволоження [4]. У таких ситуаціях поверхневі розряди виступають прямим індикатором деградації поверхні та можуть виникати раніше за внутрішні часткові розряди. Водночас під час їх вимірювання часто спостерігається супутній коронний розряд на елементах конструкції або вимірювального тракту, імпульси якого накладаються на сигнали поверхневих розрядів і ускладнюють їх коректну ідентифікацію, що зумовлює необхідність надійного розрізнення цих типів розрядів. При цьому одним із ключових чинників, що ускладнюють таке розрізнення в умовах реальних вимірювань, є супутня поява коронного розряду в елементах вимірювальної системи.

Таким чином, під час експериментальних і діагностичних вимірювань поверхневих розрядів важливо забезпечити такі умови, за яких

виникнення коронного розряду мінімізується або повністю усувається. Коронні розряди в елементах вимірювальної системи генерують додаткові імпульсні сигнали, які можуть переважати в загальному масиві зареєстрованих сигналів і маскувати імпульси поверхневих розрядів. Це ускладнює інтерпретацію результатів вимірювань і може призводити до хибних висновків щодо інтенсивності та характеру поверхневих розрядів. У зв'язку з цим актуальною є задача аналізу умов виникнення коронного розряду під час вимірювань і розроблення практичних способів його усунення з метою підвищення достовірності результатів досліджень. Зазначені обставини зумовлюють підвищений інтерес наукових досліджень до аналізу характеристик поверхневих і коронних розрядів, а також до розроблення підходів щодо їх розрізнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками значна кількість досліджень присвячена вивченню характеристик поверхневих часткових розрядів у різних ізоляційних системах та умовах експлуатації. У роботі [5] запропоновано підхід до ідентифікації поверхневих розрядів у комплексних розподільних пристроях з твердою ізоляцією на основі аналізу акустичних сигналів. Використання пакетного вейвлет-розкладу та методів машинного навчання дозволило виділити характерні енергетичні ознаки поверхневих розрядів і відокремити їх від сторонніх акустичних завад. Подібний підхід до диференціації типів розрядів за частотними характеристиками акустичних сигналів застосовано також у роботах, присвячених ультразвуковому моніторингу часткових розрядів, де показано можливість розрізнення коронних і поверхневих розрядів на основі аналізу частотних спектрів акустичних сигналів [6].

Інший напрям досліджень зосереджений на аналізі механізмів виникнення та розвитку поверхневих розрядів в ізоляційних матеріалах. У роботах, присвячених електрообладнанню з паперово-масляною та полімерною ізоляцією, показано, що розвиток поверхневих розрядів відбувається поетапно і супроводжується змінами амплітуди, частоти та фази імпульсів часткових розрядів [7]. Дослідження з використанням аналізу часткових розрядів у фазовій області (Phase-Resolved Partial Discharge або PRPD в англійській літературі), аналізу послідовності імпульсів (Pulse Sequence Analysis або PSA в англійській літературі) та часово-частотного аналізу демонструють чутливість параметрів імпульсів до типу дефекту, умов навантаження та фізичних властивостей поверхні

ізоляції [8]. Разом з тим у реальних умовах вимірювань ці характеристики можуть суттєво спотворюватися через наявність коронних розрядів, що ускладнює однозначну інтерпретацію результатів.

Окрема група робіт присвячена впливу таких зовнішніх факторів, як забруднення, зношування поверхні, атмосферного тиску та геометрії електродів на параметри поверхневих і коронних розрядів. Показано, що за зниженого тиску або за наявності неоднорідного електричного поля зростає інтенсивність як поверхневих, так і коронних розрядів, а параметри їх імпульсних сигналів можуть частково перекриватися [9], [10]. Це особливо актуально для вимірювань у високовольтних установках, авіаційних системах та системах середньої напруги постійного струму, де одночасно можуть виникати різні типи часткових розрядів [8], [9]. У таких умовах коронні розряди часто формують інтенсивний імпульсний фон, який маскує сигнали поверхневих розрядів [11].

Таким чином, аналіз сучасних досліджень свідчить, що хоча накопичено значний обсяг експериментальних даних щодо характеристик поверхневих і коронних розрядів, задача їх надійного розпізнавання під час вимірювань залишається актуальною. Особливої уваги потребує відокремлення імпульсів поверхневих часткових розрядів від імпульсів коронного розряду в умовах їх одночасної присутності у вимірювальній системі, що прямо відзначається в роботах, присвячених візуалізації та порівняльному аналізу різних типів розрядів [6], [11]. Це обґрунтовує необхідність подальших досліджень, спрямованих на аналіз відмінних ознак імпульсів поверхневих і коронних розрядів та розроблення методів підвищення достовірності їх розпізнавання. Водночас у більшості наявних робіт основна увага зосереджена на алгоритмах обробки та класифікації сигналів, тоді як питання усунення коронного розряду безпосередньо на етапі вимірювання залишається недостатньо висвітленим.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження впливу коронного розряду на результати вимірювання поверхневих розрядів та обґрунтування необхідності його усунення під час експериментальних досліджень, а також аналіз заходів, спрямованих на запобігання виникненню коронного розряду для підвищення достовірності реєстрації та інтерпретації сигналів часткових розрядів.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети було проведено серію лабораторних експериментів з листами електротех-

нічного картону, спрямованих на аналіз впливу коронного розряду на результати вимірювання поверхневих розрядів. Часткові розряди є важливим індикатором стану ізоляції в електричних системах, а їх коректне вимірювання має вирішальне значення для забезпечення надійності роботи обладнання. Крім наукової та практичної значущості, знання механізмів виникнення та характеристик часткових розрядів є важливим компонентом підготовки інженерів-енергетиків, оскільки дозволяє правильно оцінювати стан ізоляції, прогнозувати її ресурс та приймати обґрунтовані рішення щодо технічного обслуговування високовольтного обладнання. Однією з основних проблем у дослідженні часткових розрядів є необхідність їх диференціації від сигналів, що виникають через коронні розряди. На електричних підстанціях коронні розряди виникають на елементах високовольтного обладнання з локально посиленням електричним полем, зокрема на заострених краях проводів і шин, виступах контактів, вузлах з'єднань та ділянках із забрудненою або пошкодженою поверхнею ізоляторів. Підвищенню ймовірності появи таких розрядів сприяють вологість, пил, сіль та інші забруднення, що створюють локальні точки концентрації поля та полегшують іонізацію повітря. Коронні розряди можуть значно спотворювати результати вимірювань, оскільки їх імпульсні характеристики частково збігаються з характеристиками поверхневих розрядів, що ускладнює їх точну ідентифікацію. Враховуючи це, одним із важливих завдань є розробка методів для усунення впливу коронних розрядів та підвищення точності реєстрації і інтерпретації сигналів часткових розрядів. У цьому контексті особливу увагу слід приділити удосконаленню вимірювальних умов, що дозволить значно знизити ймовірність виникнення коронних розрядів під час експериментальних досліджень, а також забезпечити більшу достовірність отриманих результатів.

Для проведення дослідження в даній роботі було запропоновано та використано систему електродів, структурно показано на рис. 1.

На рис. 1 цифрами позначено: 1 – зразок листового електротехнічного картону; 2 – високовольтний електрод; 3 – заземлений електрод; 4 – заострений коронуючий електрод.

Для ілюстрації зазначеної вище проблеми на рис. 2–4 наведено осцилограми сигналів часткових розрядів, отримані в результаті аналізу часткових розрядів у часовій області (Time-Resolved Partial Discharge або TRPD в англійській літературі)

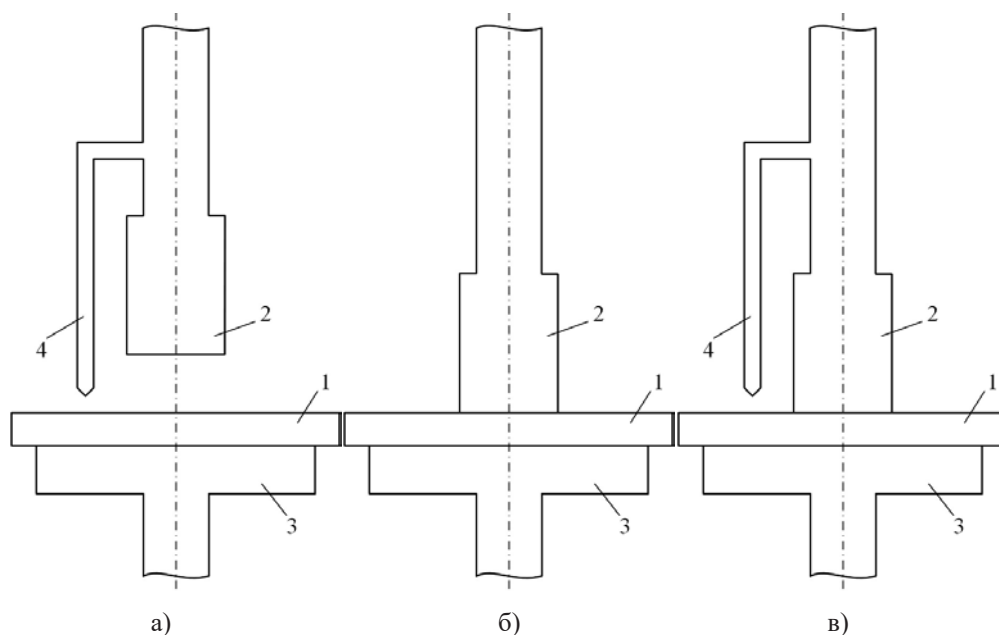


Рис. 1. Система електродів, де можливі наступні види часткових розрядів:

а) тільки коронний розряд; б) тільки поверхневий розряд; в) коронний та поверхневий розряд разом

в трьох різних експериментальних умовах. Лабораторні дослідження виконано з використанням електричного методу виявлення часткових розрядів; схема вимірювальної установки відповідає описаній у роботі [12] і тому в цій статті не наводиться. В усіх трьох випадках амплітуда прикладеної напруги дорівнює 4,0 кВ. На рис. 2 представлено осцилограму коронного розряду, сформованого в системі з тонким коронуючим електродом (рис. 1,а). Характер сигналу в цьому випадку визначається умовами виникнення корони в газовому середовищі поблизу електродів.

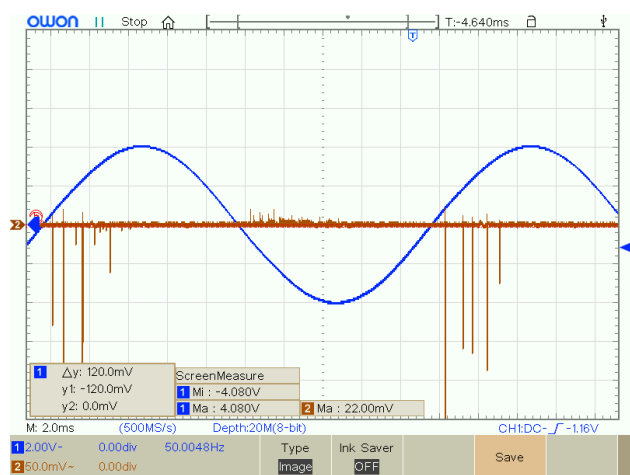


Рис. 2. Імпульси коронного розряду в повітрі

Осцилограма, наведена на рис. 3, відповідає поверхневим розрядам уздовж поверхні електротехнічного картону за відсутності коронного

розряду. Для виключення впливу корони в даній системі були використані з'єднувальні провідники збільшеного діаметра, які запобігають появі коронного розряду (рис. 1,б). Це дозволяє розглядати зафіксовані імпульси як такі, що обумовлені виключно поверхневими розрядами.

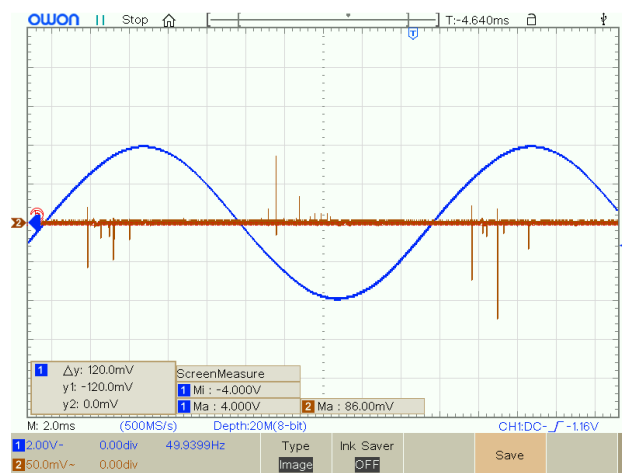


Рис. 3. Імпульси поверхневого розряду вздовж поверхні електротехнічного картону

На рис. 4 наведено осцилограму, на якій одночасно присутні імпульси поверхневих розрядів уздовж поверхні електротехнічного картону та імпульси коронного розряду. У цьому випадку застосування тонких коронуючих провідників було здійснено цілеспрямовано з метою створення умов для виникнення корони (рис. 1,в). Аналіз даної осцилограми показує, що за візуальним спостереженням осцилограм істотно ускладнюється

однозначне розрізнення імпульсів різної природи, оскільки їх амплітудні та часові характеристики можуть суттєво перекриватися.

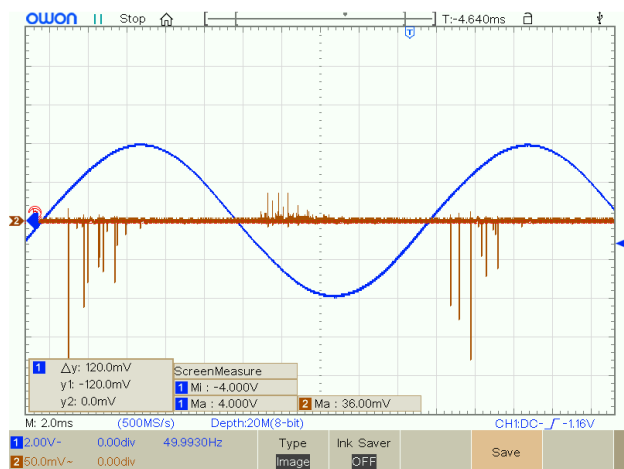


Рис. 4. Імпульси поверхневого розряду із накладанням сигналів від коронного розряду навколо з'єднувального провідника

Наведені приклади наочно демонструють, що навіть за контрольованих лабораторних умов і відомої конфігурації випробувальної системи задача ідентифікації типів часткових розрядів за формою сигналів є нетривіальною. В реальних умовах експлуатації електрообладнання, де одночасно можуть бути присутні кілька джерел часткових розрядів та значний рівень завад, проблема розпізнавання набуває ще більшої складності, що обумовлює необхідність розроблення та вдосконалення методів аналізу і класифікації сигналів часткових розрядів.

Для перевірки надійності отриманих результатів експерименту було проведено серію контрольних вимірювань за зниженої амплітуди прикладеної напруги. Отримані осцилограми наведено на рис. 5–7. Так, на рис. 5 показано осцилограму коронного розряду, отриману при меншій амплітуді прикладеної напруги, як становить 3,0 кВ. Як і в попередньому випадку при 4,0 кВ, розряд утворюється в системі з тонкими коронуючими провідниками, що створюють умови для виникнення корони. Порівняння з осцилограмою на рис. 1 підтверджує, що на цьому графіку зафіксовані імпульси, характерні для коронного розряду.

На відміну від попереднього випадку при 4,0 кВ, за меншої напруги 3,0 кВ поверхневі розряди вздовж поверхні електроізоляційного картону не виникають, що підтверджує відсутність імпульсів на осцилограмі на рис. 6. У цій системі були використані з'єднувальні провідники збільшеного діаметра, що запобігають виникненню коронного розряду, сигнали яких також відсутні на осцилограмі.

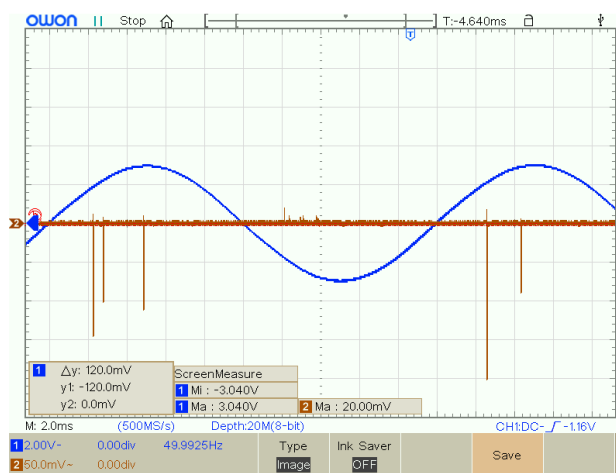


Рис. 5. Імпульси коронного розряду в повітрі при зниженій прикладеній напрузі

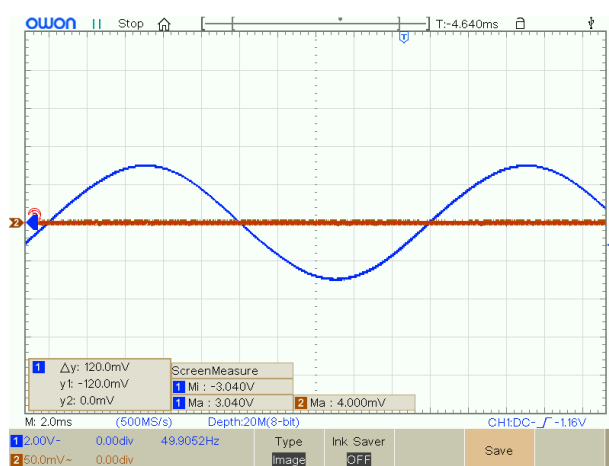


Рис. 6. Відсутність поверхневих та коронних розрядів в системі із з'єднувальними провідниками збільшеного діаметра при зниженій прикладеній напрузі

На рис. 7 наведено осцилограму, що показує тільки імпульси коронного розряду при напрузі 3,0 кВ. Знову ж таки, в цій системі використовуються тонкі коронуючі провідники, які створюють умови для виникнення корони, однак прикладеної напруги недостатньо для виникнення поверхневих розрядів. Це підтверджує, що на осцилограмі є тільки імпульси, характерні для коронного розряду, а поверхневі розряди відсутні через недостатній рівень напруги.

Таким чином, порівняльний аналіз осцилограм, представлених на рис. 5–7, підтверджує, що на рис. 2 та 4 дійсно зафіксовано імпульси коронного розряду. Це пояснюється тим, що при напрузі 3,0 кВ спостерігається виникнення коронного розряду, тоді як поверхневі розряди у цих умовах не виникають і, відповідно, не реєструються. Отже, результати проведених вимірювань

підтверджують коректність постановки експерименту і дають змогу зробити обґрунтовані висновки щодо впливу коронного розряду на точність вимірювань поверхневих розрядів.

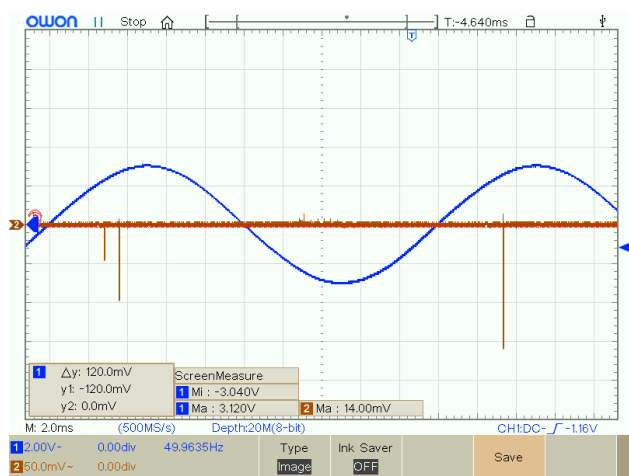


Рис. 7. Імпульси коронного розряду при зниженій прикладеній напрузі в системі з тонкими з'єднувальними провідниками, без виникнення поверхневих розрядів

Загалом, при діагностиці електричного обладнання на рівень часткових розрядів електричними методами виявлення часткових розрядів можуть виникати значні труднощі, пов'язані з наявністю електромагнітних завад і коронних розрядів, що утворюються на елементах оточуючого високовольтного обладнання в умовах складного електромагнітного середовища електростанцій та підстанцій [13, 14]. Оскільки сигнали часткових розрядів, як правило, мають малу амплітуду, навіть відносно незначний рівень шуму або зовнішніх електромагнітних перешкод може істотно спотворювати результати вимірювань або призводити до маскування корисного сигналу. Коронні розряди при цьому створюють додаткові імпульсні сигнали, які за часовими та амплітудними характеристиками можуть збігатися з імпульсами часткових розрядів, що суттєво ускладнює їх коректну ідентифікацію. Підвищений рівень шуму, характерний для реальних умов експлуатації енергетичного обладнання, додатково обмежує можливості виявлення слабких часткових розрядів і ускладнює точне оцінювання стану ізоляції. Таким

чином, для підвищення достовірності результатів діагностики необхідно забезпечувати низький рівень фоновому шуму та розробляти методи, що дозволяють ефективно відокремлювати коронні розряди й шумові компоненти від сигналів часткових розрядів з урахуванням специфіки умов експлуатації електрообладнання.

Висновки.

У результаті проведеного дослідження було встановлено суттєвий вплив коронного розряду на вимірювання поверхневих розрядів у високовольтних установках. Аналіз осцилограм сигналів часткових розрядів, отриманих при різних умовах експериментальних досліджень, показав, що коронні розряди значно спотворюють результати вимірювань і ускладнюють точну ідентифікацію поверхневих розрядів. Зокрема, в умовах одночасного виникнення обох типів розрядів їх імпульсні характеристики частково перекриваються, що ускладнює розрізнення сигналів і може призвести до хибних висновків щодо інтенсивності та частоти повторень поверхневих розрядів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні необхідності розроблення методів, що дозволяють ефективно відокремлювати імпульси коронних розрядів від сигналів поверхневих розрядів, пов'язаних із реальними дефектами або погіршенням стану ізоляції. Урахування факторів, що сприяють виникненню коронних розрядів, та удосконалення процедур вимірювання, там, де це можливо, є важливими для підвищення точності ідентифікації різних типів часткових розрядів у реальних умовах експлуатації електрообладнання. Це дозволить забезпечити коректне оцінювання стану ізоляції та своєчасне виявлення дефектів, що можуть призвести до зниження надійності та передчасного скорочення ресурсу електрообладнання.

Таким чином, для успішної діагностики часткових розрядів в ізоляції електрообладнання високої напруги важливо враховувати можливий вплив коронних розрядів та електромагнітних завад, а також впроваджувати нові методи, що дозволяють мінімізувати їх вплив на результати вимірювань, забезпечуючи точне та достовірне визначення стану електричної ізоляції.

Список літератури:

1. Ludpa S., Pattanadech N., Leelajindakrairerk M., Yutthagowith P. Pattern classification of partial discharge in high voltage equipment by regression analysis. 2008 5th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Krabi, Thailand. 2008. pp. 921-924. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTICON.2008.4600581>.
2. Wang H., Jin L. -J., Lu P. -Y., Gao K. Physical stages dividing and quantitative study of insulator surface discharges. 2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Greifswald, Germany. 2018. pp. 131-134. DOI: <https://doi.org/10.1109/DEIV.2018.8536994>.

3. Puhan D. K., Sharma R., Kandiban R., Rao B. N. Application of optoelectronic technique for detection of air corona, surface discharges at cable termination and end winding of stator coil. 2019 IEEE 4th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Chennai, India. 2019. pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/CATCON47128.2019.CN0090>.
4. Li X., Jin L., Cai J., Shi H. Surface discharge detection of external insulation of outdoor vacuum circuit breaker based on ultraviolet imaging. 2016 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Suzhou, China. 2016. pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/DEIV.2016.7748688>.
5. Hou C., Jia M., Cao Y. Surface discharges identification of 10 kV solid insulation cabinet based on energy characteristics extraction of audio signal. 2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Greifswald, Germany. 2018. pp. 143-146. DOI: <https://doi.org/10.1109/DEIV.2018.8537097>.
6. Pihera J., Turecek O., Balvin O., Reboun J. Acoustic monitoring of partial discharges: differentiating corona and surface discharges using ultrasonic methods. 2025 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Manchester, United Kingdom. 2025. pp. 273-276. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP61707.2025.11218341>.
7. Yang Z., Xue Z., Yan X., Pan S., Ge J., Xiao Q. Research on the development process of surface discharge defects of oil-paper insulation structures. 2024 6th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET), Beijing, China. 2024. pp. 234-238. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPET62369.2024.10940277>.
8. Im J., Oh D., Kim M., Lee E., Kim Y. Partial discharge pattern analysis of metallic particle influence on polymer surfaces in MVDC stations. 2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Gangneung, Republic of Korea. 2024. pp. 493-495. DOI: <https://doi.org/10.23919/CMD62064.2024.10766184>.
9. Anand S., Araya S. B., Slama M. E. A., Henrard P., Philippe A. Surface discharges inception & flashover of solid insulating materials with homogeneous and inhomogeneous electrical fields for aeronautical applications. 2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD), Toulouse, France. 2024. pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICD59037.2024.10613313>.
10. Tharamal L., Hadjadj Y., Ghunem R. A., McIntyre D., El-Hag A., Uckol H., Alqudsi A. Y., Arenas O., Jang D. Investigating the corona and surface discharges at varying altitudes using high voltage AC waveforms. 2025 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Manchester, United Kingdom. 2025. pp. 724-727. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP61707.2025.11218569>.
11. Nugra G., Quizhpi-Palomeque F., Sánchez L., Quizhpi-Cuesta M. Determination of patterns of surface and corona discharges in polymer insulators since 13.8 kV up to 22 kV. 2025 9th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), Singapore, Singapore. 2025. pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICGEA64602.2025.11009551>.
12. Trotsenko Y., Protsenko O., Nesterko A., Chyzhevskiy V., Mykhailenko V. Calibration of experimental installation for measuring partial discharges in low capacitance insulation samples. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University. 2021. Issue 5(130). pp. 97-102. DOI: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.5.97-102>.
13. Ma C., Li H., Zhou W., Yu J., Wang L., Yang S., Hu S. Background noise of partial discharge detection and its suppression in complex electromagnetic environment. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece. 2018. pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2018.8642084>.
14. Burada E. -D., Popescu M., Nicoară T., Voicu V., Dumbravă I. Methods for reducing electromagnetic disturbances in partial discharge measurement circuits for insulation assessment of high voltage equipment. 2025 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2025 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Timisoara, Romania. 2025. pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/OPTIM-ACEMP62776.2025.11075231>.

Trotsenko Ye.O., Nesterko A.B., Protsenko O.R., Peretyatko Yu.V. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CORONA DISCHARGES ON THE RELIABILITY OF SURFACE DISCHARGE MEASUREMENTS IN HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL INSTALLATIONS

The article considers the problem of the influence of corona discharge on the accuracy of surface discharge measurements in high-voltage installations. Partial discharges are important indicators of the state of electrical insulation and are widely used to assess the technical condition and predict the residual life of electrical equipment. Detection and analysis of these discharges allow for timely diagnosis of defects in insulating materials and prediction of potential accidents. However, during actual partial discharge measurements at the operating site, the presence of corona discharge in structural elements or the measuring system can significantly distort the measurement results. This occurs due to partial overlap of the pulse characteristics of corona and

surface discharges, which makes it difficult to correctly identify the types of partial discharges and can lead to erroneous conclusions about the state of the insulation. Analysis of the results of experimental studies, in particular measurements on insulating cardboard, showed that in conditions of simultaneous occurrence of corona and surface discharges, it is important to consider factors that can minimize or completely eliminate the influence of corona on the measurement results. In particular, this concerns the improvement of the design of measuring systems and experimental conditions. Therefore, to ensure the reliability of measurement results, it is necessary to develop methods that allow for the effective separation of corona discharge pulses from signals of other partial discharges. Taking into account the factors contributing to the occurrence of corona discharges and improving measurement procedures where possible are important to increase the accuracy of identifying partial discharge types in real-world operating conditions. This will ensure correct assessment of the insulation condition and timely detection of defects that can lead to deterioration of the insulation condition and equipment failure. Thus, for effective partial discharge diagnosis in high-voltage systems, it is necessary to consider the potential impact of corona discharges and electromagnetic interference, as well as to implement new methods that minimize their influence on measurement results, ensuring accurate and reliable assessment of insulation condition and equipment resource forecasting.

Keywords: *high-voltage equipment, insulation diagnosis, partial discharges, signal interpretation, corona discharges, surface discharges, solid insulation.*

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

ПРИЛАДИ

УДК 62.408

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/10>**Гайдай Г.Ю.**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
<https://orcid.org/0000-0002-7454-8007>**Грешнов А.Ю.**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
<https://orcid.org/0000-0002-9350-1554>

АВТОМАТИЗОВАНА МОБІЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТОЧНОСТІ ПОВІРОЧНИХ ПЛИТ

Підвищення рівня метрологічного забезпечення плит повірочних та розмірочних обумовлено їхнім місцем в забезпеченні якості продукції, оскільки на них проводиться розмітка перед виготовленням та остаточний контроль деталей після виготовлення. Поставлена проблема і дала поштовх до розробки удосконаленої мобільної установки для визначення відхилення від площини повірочних та розмірочних плит. У роботі представлено удосконалену мобільну установку для визначення відхилення від площини повірочних і розмірочних плит, а також систему її метрологічного забезпечення та протокольного підтвердження результатів вимірювань. Проведено аналіз існуючих методів контролю відхилення від площини, обґрунтовано вибір технічних засобів і структурних рішень. Розроблено структурну та функціональну схеми. Отримані результати забезпечують підвищення точності, надійності та зручності виконання вимірювань у лабораторних і виробничих умовах. На основі проведеного аналізу з'явилася нагальна потреба в створенні автоматизованої установки отримання показань та обробки результатів вимірювань із застосуванням сучасних електронних вимірювальних приладів, пов'язаних з ЕОМ, на базі чого було розроблено автоматизовану мобільну установку для перевірки геометричної точності повірочних плит, що дозволила підвищити точність та надійність отриманих даних. У якості конструктивного рішення було знайдено електронний рівень, визначено ряд переваг перед іншими приладами, підібрано та описано елементи, які необхідні для безпосереднього сполучення перетворювача з ЕОМ. Об'єктом дослідження даної установки є повірочна та розмірочна плита. За допомогою рівня брускового та у відповідності до методики перевірки, повірочна та розмірочна плита виставляється в горизонтальне положення. В перетворювач входить чутливий елемент – маятник, який контролюється індуктивним датчиком. В електронний блок надходять сигнали з перетворювача та реєстратора температури. Далі оброблений сигнал поступає на ЕОМ.

Ключові слова: повірочна плита, розмірочна плита, електронний рівень, автоматичне регулювання, метрологічне забезпечення.

Постановка проблеми. У сучасному світі велике значення в економічній діяльності підприємства має конкурентоспроможність продукції, що виробляється. Це переважно полягає в якості продукції.

При формуванні якості продукції на машинобудівному підприємстві вимірювальна інформація про геометричні розміри, форми та розміщення поверхонь повинна буди істиною. Тобто для цього необхідно застосовувати засоби вимірювальної

техніки, що мають достатні метрологічні характеристики, надійність та продуктивність контролю з врахуванням рівня розвитку науково технічного прогресу. Таким чином, підвищення рівня метрологічного забезпечення плит повірочних та розмірочних обумовлено їхнім місцем в забезпеченні якості продукції, оскільки на них проводиться розмітка перед виготовленням та остаточний контроль деталей після виготовлення. Поставлена проблема і дала поштовх до розробки удосконаленої



мобільної установки для визначення відхилення від площини повірочних та розмірочних плит.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час відхилення від площини робочих поверхонь плит визначають за допомогою таких засобів вимірювання, як: автоколіматор, оптична лінійка, бульбашковий рівень, мікронівелір [1]. Існує безліч різних методик визначення відхилення від площини плит [2]:

1. *Методика вимірювання відхилення від площинності автоколіматором:* плоске дзеркало, що входить в комплект автоколіматора, закріплюють на вимірювальній каретці, відстань між опорами якої встановлюють рівним відстані між точками, що перевіряються. При перевірці плит розміром від 400×400 до 1000×630 мм в якості вимірювальної каретки можна використати синусну лінійку з відстанню між опорами 100 мм [2].

2. *Методика вимірювання відхилення від площинності оптичною лінійкою:* при повірці плит розміром до 630×400 мм плиту, що повіряється, і оптичну лінійку рекомендується встановлювати на плиту більшого розміру. Лінійку поміщають на домкрати, якими регулюють її положення по висоті [3].

3. *Методика вимірювання відхилення від площинності бульбашковим рівнем і мікронівеліром:* рівень закріплюють на вимірювальній каретці з відповідною відстанню між опорами, а ампулу мікронівеліра – на одній із змінних основ, що входять в його комплект. Положення точок, що перевіряються, в перерізах визначають таким же чином, як при вимірюванні автоколіматором. При вимірюванні визначають на кожній ділянці контрольованого перерізу зміщення бульбашки ампули рівня або мікронівеліра відносно нульових штрихів шкали [1].

4. *Методика вимірювання відхилення від площини звіренням із зразковими повірочними лініями за допомогою компаруючого пристрою або пристроїв з вимірювальними головками:* при вимірюванні використовують повірочні лінійки і компаруючий пристрій. Спочатку проводять вимірювання в діагональних перерізах. Зразкову лінійку поміщають на опорні призми, що входять до складу компаруючого пристрою (або пристрою з вимірювальними головками), і встановлюють її вздовж однієї з діагоналей плити так, щоб середина лінійки співпала з центром плити. У центральну точку плити встановлюють стійку з вимірювальною головкою, піднімають її до стикання вимірювального наконечника з робочою поверхнею зразкової лінійки і, встановивши на шкалі

близьке до нуля показання, закріплюють головку в стійці [1].

5. *Методика вимірювання відхилення від площинної гідростатичним рівнем:* вимірювання проводять тільки в повздовжніх перерізах. Одну вимірювальну головку встановлюють на одну з кутових точок плити, а другу – послідовно на всі точки, що перевіряються, і кожного разу знімають показання з обох головок. Показання записують в протокол довільної форми [2].

Виокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Проаналізувавши конструкцію повірочних та розмірочних плит, а також вивчивши існуючі методики їх повірки, можна визначити ряд недоліків:

- значна трудомісткість повірочного процесу;
- тривале зняття показань вимірювань та їх обробка вручну;
- значний вплив людського фактору на результат вимірювання, який прямо пов'язаний з точністю отримання результатів;
- неможливість повірки плит безпосередньо на місці їх установки.

Виходячи із зазначеного, виникає нагальна потреба в створенні автоматизованої установки отримання показань та обробки результатів вимірювань із застосуванням сучасних електронних вимірювальних приладів, пов'язаних з ЕОМ.

Постановка задачі. Метою дослідження є розробка автоматизованої мобільної установки для визначення відхилення від площини повірочних та розмірочних плит, яка забезпечить підвищення точності вимірювання відхилення від площини вищезазначених плит, а також зниження трудомісткості та часу виконання, що, у свою чергу, дасть можливість не знизити клас точності плит та полегшити роботу метролога.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження даної установки є повірочна та розмірочна плита. За допомогою рівня брускового та у відповідності до методики повірки [4, 6], повірочна та розмірочна плита виставляється в горизонтальне положення. В перетворювач входить чутливий елемент – маятник, який контролюється індуктивним датчиком. В електронний блок надходять сигнали з перетворювача та реєстратора температури. Далі оброблений сигнал поступає на ЕОМ.

На рис. 1 представлено структурну схему установки для вимірювання відхилення від повірочних та розмірочних плит.

Допуск площинності робочих поверхонь плит не повинен перевищувати значень, зазначених

в ДСТУ 10905-86 «Плити повірочні та розмірочні. Технічні умови», відповідно до розміру плит та їх класу точності. Плити повинні періодично проходити перевірку метрологічною службою підприємства. Визначається допуск площинності та підтверджується клас точності плити [9]. Це дуже важливо, тому що плити можуть використовуватись для повірочних робіт та можуть бути використані як основи під високоточні прилади.

Умови експлуатації установки:

- температура навколишнього середовища: +20 ... +40 ;
- відносна вологість повітря: 45...80 %;
- атмосферний тиск: 630 ... 800 мм.рт.ст;
- вібрація – пікове значення віброзміщення при частоті 10 Гц не повинне перевищувати 50 мкм/с;
- запиленість приміщення – клас чистоти повітря 4 по ОСТ 1.41519;
- опір контуру заземлення – менше 4 Ом.

Брусковий рівень служить для контролю горизонтального положення плити, інших плоских та циліндричних поверхонь, а також вимірювання малих кутів [5].

На рис. 2 представлено конструкцію брускового рівня.

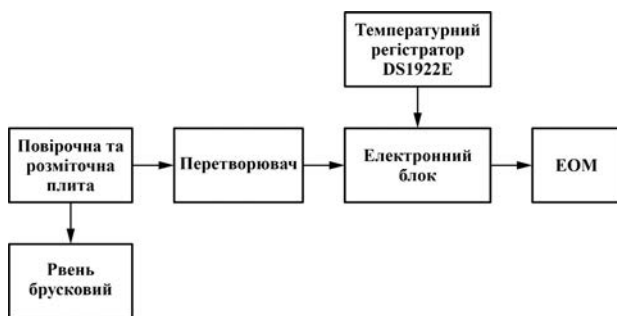


Рис. 1. Структурна схема установки для вимірювання відхилення від повірочних та розмірочних плит

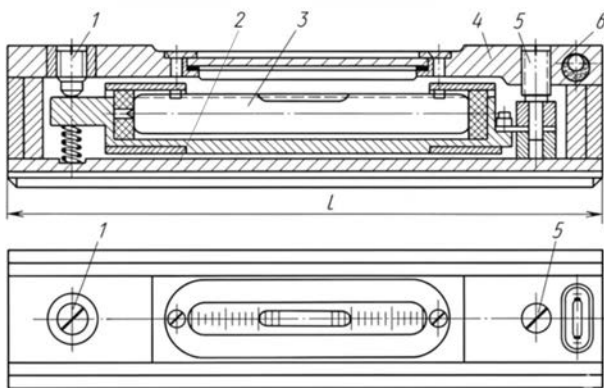


Рис. 2. Креслення брускового рівня

Корпус 4 брускового рівня на нижній робочій поверхні має призматичну виїмку для встановлення на циліндричні поверхні. Амбула 3 закріплена в оправу 2 та встановлена всередині корпусу рівня. Кріплення оправу ампули до корпусу здійснюється гвинтом 5 через плоску пружину. Інший кінець оправу пружиною підібраний до гвинта регулювання 1, яким під час зборки рівня встановлюється паралельність ампули відносно основи. Над ампулою в корпусі рівня вирізано вікно, що закрите рамкою зі склом. Установочна ампула 6 розміщена в поперечному отворі корпусу, та залита твердим составом.

Чутливим елементом рівня є ампула, що представляє собою запаяну циліндричну скляну трубку, заповнену рідиною із залишком маленького пухирця повітря. Внутрішня поверхня ампули шліфується по радіусу. На зовнішній верхній поверхні ампули наноситься шкала з інтервалом ділень, рівним 2 мм. Дія ампули основана на тому, що при її нахилі рівень рідини в ній завжди розташовується горизонтально та пухирець переміщується в найвищу точку ампули. Відлік по шкалі відбувається по краям пухирця повітря.

Якщо при перевірці горизонтальності плити, пухирець повітря не встановлюється на нульові положення, то необхідно за допомогою регулювальних гвинтів виставити плиту в горизонтальне положення.

Електронний блок представляє собою систему автоматичного регулювання, що забезпечує постійне положення маятника відносно корпусу перетворювача, який встановлюється на вимірювальну поверхню. Положення маятника регулюється індуктивним датчиком, сигнал з якого потрапляє в систему автоматичного регулювання.

При нахилі корпусу перетворювача на маятник діє тангенціальна складова сили тяжіння, пропорційна куту нахилу (при малих кутах). Для компенсації цієї сили служить сила електромагнітного поля, що створюється пристроєм магнітоелектричної системи, котушка якого ввімкнена в коло зворотнього зв'язку системи автоматичного регулювання.

Сила електромагнітного поля пропорційна струму через котушку.

Внаслідок рівності сил, що діють на маятник, струм крізь котушку пропорційний куту нахилу вимірювальної поверхні відносно лінії горизонту та служить для подальшого перетворення та відліку цього кута.

Електронний блок виконаний в настільному варіанті. Всі вузли та плати закріплені в єдиному

каркасі та з'єднані в електричну схему за допомогою джгута та рознімачів.

Пристрій автоматичного регулювання (ПАР) (рис. 3) призначений для підсилення модульованого сигналу від індуктивного датчика, демодуляції та автоматичного регулювання рівня сигналу, що забезпечує постійне положення маятника відносно корпусу перетворювача.

Додаткові функції:

- виділення за допомогою фільтрів корисних та заглушення паразитних сигналів;
- узгодження рівнів сигналів ПАР з мікроконтролером;
- отримання стандартного рівня напруги на аналоговому виході.

Також в електронному блоці розміщено мікроконтролер, який виконує програму, записану в його пам'яті. На нього поступає інформація від системи автоматичного регулювання, а також від реєстратора температури.

Температурний реєстратор DS1922E – є самодостатньою системою, яка після її вибраних користувачем настановних значень вимірює температуру і записує результати в захищену секцію вбудованої незалежної пам'яті даних. Запис проводиться визначуваною користувачем швидкістю. Прилад може зберігати в пам'яті 8192 8-розрядних значень температури або 4096 16-розрядних значень температури з інтервалом від 1 секунди до 273 годин. На додаток до цього в DS1922E має 576 байт додаткової пам'яті (SRAM) для зберігання характеристик реєстрованого процесу, його особливостей або особливостей місця установки приладу. Користувач може встановити момент початку реєстрації даних [7, 8].

Реєстрація може початися відразу після всіх параметрів вимірювання, через визначувану користувачем тимчасову затримку або після досягнення температурою порогового значення. Доступ до пам'яті і функцій управління може бути захищений паролем.

DS1922E використовує для зв'язку з пристроями підтримки протокол 1-Wire, який вимагає лише однієї шини даних. Кожен DS1922E має унікальний, фабричний, підготовлений лазером 64-розрядний реєстраційний ідентифікаційний номер, що дозволяє безпомилково ідентифікувати прилад. Міцний корпус MICROCAN [10], в якому розміщена електронна схема DS1922E, володіє високою стійкістю до дій навколишнього середовища, таких як забруднення, вологість, удари. Цей компактний, монетоподібний корпус легко фіксується спеціальними зондами для прочитування інформації, що значно полегшує роботу оператора з приладом. Інші спеціальні аксесуари для фіксації пристроїв в подібних корпусах дозволяють легко закріплювати прилади DS1922E на будь-якій поверхні, включаючи контейнери, чохли, кювети і т. д.

Функціональна схема на рис. 4 показує зв'язок між основними вузлами управління і секціями пам'яті приладу DS1922E.

Прилад має п'ять головних областей даних:

- 1) 64-бітовий ідентифікаційний ПЗП, проширений лазером;
- 2) 256-бітову «блокнотну» пам'ять;
- 3) 576-байтне статичне службове ОЗУ (додаткова пам'ять);
- 4) дві 256-бітові сторінки реєстрів (керування, зберігання часу, лічильників, статусу і паролів);
- 5) 8192 байта буфера послідовних температурних відліків для зберігання накопичених результатів.

За винятком ідентифікаційного ПЗП і «блокнотної» пам'яті всі інші області розташовані в єдиному лінійному адресному просторі. Вся пам'ять, службовка для зберігання результатів, реєстри лічильників і деякі інші реєстри доступні тільки для читання. Обидві реєстрові сторінки захищено від запису, прилад програмується на наступний цикл вимірювань. Реєстри паролів (один реєстр пароля читання і один реєстр пароля читання/запису) доступні тільки для запису.

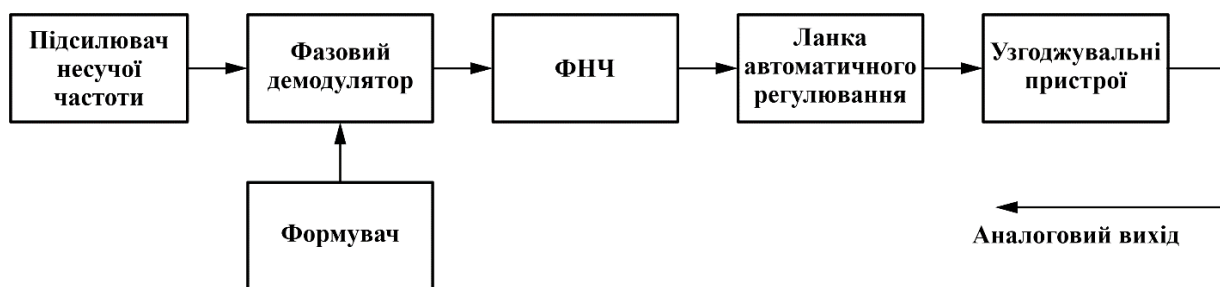


Рис. 3. Структурна схема ПАР

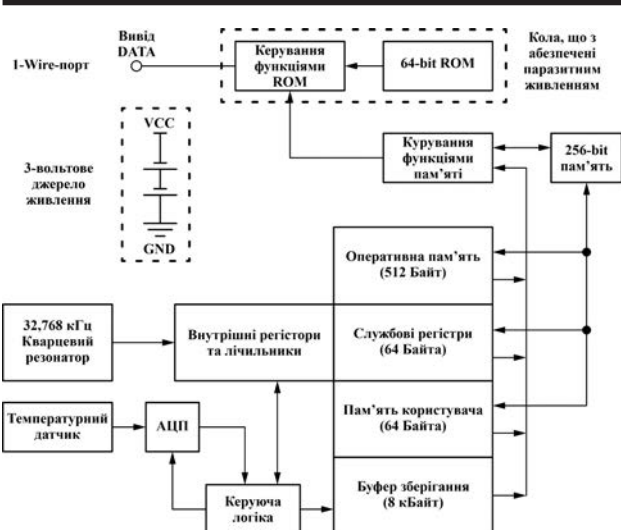


Рис. 4. Функціональна схема зв'язку між основними вузлами управління і секціями пам'яті приладу DS1922E

Ієрархічна структура 1-протоколу інформаційного обміну приладу показана на рис. 5.

Спочатку ведучий 1-Wire-шини повинен адресувати пристрій, згенерувавши одну із стандартних команд, пов'язаних з ідентифікаційним ПЗП пристрою: 1) читання ПЗП, 2) збіг ПЗП, 3) пошук ПЗП, 4) умовний пошук ПЗП, 5) пропуск ПЗП, 6) прискорений пропуск ПЗП, 7) прискорений збіг ПЗП, 8) відновлення. Після виконання команд Прискорений Пропуск ПЗП або Прискорений збіг ПЗП при стандартній швидкості обміну, прилад перейде в прискорений режим, де обмін відбувається з вищою швидкістю. Протокол потрібен для команд, пов'язаних з функцією ПЗП. Після успішного виконання команди функції ПЗП стають доступними функції пам'яті, і ведучий 1-Wire магістралі може виконати будь-яку з восьми

Рис. 5. Структура протоколу обміну пристроєм DS1922E

доступних команд функції пам'яті. Читання і запис всіх даних проводиться, починаючи з молодшого значущого біта.

Висновки. На основі проведеного аналізу з'явилася нагальна потреба в створенні автоматизованої установки отримання показань та обробки результатів вимірювань із застосуванням сучасних електронних вимірювальних приладів, пов'язаних з ЕОМ, на базі чого було розроблено автоматизовану мобільну установку для перевірки геометричної точності повірочних плит, що дозволила підвищити точність та надійність отриманих даних. У якості конструктивного рішення було знайдено електронний рівень, визначено ряд переваг перед іншими приладами, підібрано та описано елементи, які необхідні для безпосереднього сполучення перетворювача з ЕОМ.

Список літератури:

1. Білий В.В. Основи метрології та вимірювань: навчальний посібник. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2019. 256 с.
2. Baliga B.J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. 2nd ed. Cham: Springer, 2019. 1094 p.
3. Figliola R.S. Theory and Design for Mechanical Measurements. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. 624 p.
4. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 1224 p.
5. Jaeger R.C., Blalock T.N. Microelectronic Circuit Design. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. 1344 p.
6. Kirkup L., Frenkel R.B. Measurement and Instrumentation: Theory and Application. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 590 p.
7. Lutz J., Schlangenotto H, and Scheuermann U. Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reliability. 2nd ed. Cham: Springer, 2018. 641 p.
8. Scherz P., Monk S. Practical Electronics for Inventors. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016. 1056 p.
9. Sedra A.S., Smith K.C. Microelectronic Circuits. 8th ed. Oxford: Oxford University Press, 2020. 1320 p.
10. Williams B.W. Power Electronics: Devices, Drivers, Applications, and Passive Components. 2nd ed. London: Macmillan Education UK, 2017. 320 p.

Haidai H.Yu., Hrieshnov A.Yu. AUTOMATED MOBILE DEVICE FOR CHECKING THE GEOMETRY ACCURACY OF CALIBRATION PLATES

The increase in the level of metrological support of calibration and marking plates is due to their place in ensuring product quality, since marking is carried out on them before manufacturing and final control of parts after manufacturing. The problem was posed and gave impetus to the development of an improved mobile installation for determining the deviation from the plane of calibration and marking plates. The paper presents an improved mobile installation for determining the deviation from the plane of calibration and marking plates, as well as a system for its metrological support and protocol confirmation of measurement results. An analysis of existing methods for controlling deviation from the plane was carried out, the choice of technical means and structural solutions was justified. A structural and functional scheme was developed. The results obtained provide increased accuracy, reliability and convenience of performing measurements in laboratory and production conditions. Based on the analysis, there was an urgent need to create an automated installation for obtaining readings and processing measurement results using modern electronic measuring instruments connected to a computer, on the basis of which an automated mobile installation was developed to check the geometric accuracy of calibration plates, which allowed to increase the accuracy and reliability of the obtained data. An electronic level was found as a constructive solution, a number of advantages over other devices were identified, and elements necessary for direct connection of the converter with a computer were selected and described. The object of research of this installation is a calibration and marking plate. Using a bar level and in accordance with the calibration method, the calibration and marking plate is placed in a horizontal position. The converter includes a sensitive element - a pendulum, which is controlled by an inductive sensor. The electronic unit receives signals from the converter and the temperature recorder. Then the processed signal is fed to the computer.

Keywords: calibration plate, marking board, electronic level, automatic adjustment, metrological support.

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/11>**Гуржій С.В.**<https://orcid.org/0009-0006-2632-6916>Український науково-дослідного інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України**АСПЕКТИ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ
ДЛЯ КООРДИНАЦІЇ UAV/UGV В УМОВАХ РАДІОЧАСТОТНИХ
ПЕРЕШКОД**

У статті представлено аналіз сучасних тенденцій розвитку та практичного застосування бездротових мереж типу “mesh” (WMN) у контексті зростаючих вимог до відмовостійких комунікаційних інфраструктур, здатних підтримувати автономні системи нового покоління. Основна увага приділяється концептуальним основам децентралізованих архітектур мереж типу “mesh”, їхнім функціональним можливостям та перспективам інтеграції з гетерогенними автономними платформами, зокрема безпілотними літальними апаратами (UAV) та безпілотними наземними транспортними засобами (UGV), а також розподіленими сенсорними масивами. Встановлено, що технологія WMN, заснована на принципах самоорганізації, розподіленої маршрутизації та функціональної надмірності, становить нову концепцію забезпечення масової роботизованої комунікації у складних, динамічних умовах застосування.

Детально розглянуто перехід від традиційних централізованих комунікаційних інфраструктур до децентралізованих мережесих моделей, в яких кожен вузол одночасно виконує функції хоста та ретранслятора. Встановлено, що такий підхід забезпечує живучість мережі навіть за умов значних втрат вузлів або навмисного порушення роботи інфраструктури, створюючи передумови для керування та координації в режимі реального часу. Особлива увага приділяється адаптивним протоколам маршрутизації, включаючи реактивні, проактивні та гібридні механізми, на яких базується гнучкість та масштабованість мережесих систем зв'язку. Розглянуто результати симуляції та експериментів, які підтверджують здатність архітектур WMN до швидкої реконфігурації топології, динамічного вибору шляху та безперервної ретрансляції даних в умовах активної радіоелектронної боротьби та завад.

Окремо розглянуто інновації в апаратних платформах та обчислювальних системах. Охарактеризовано інтеграцію повітряних ретрансляційних вузлів на базі UAV, багатопроцесорних модулів периферійних обчислень та гібридного комунікаційного обладнання в мережі mesh. Підкреслюється роль високоточних середовищ моделювання, які дозволяють моделювати великомасштабні гетерогенні топології мереж з повним урахуванням умов навколишнього середовища, тим самим створюючи стійку основу для перенесення протоколів з моделювання на діючі апаратні системи.

Значна увага приділяється безпеці зв'язку та стійкості електронних систем. Досліджується застосовність топологій мереж ad-hoc, когнітивного управління спектром та багатоканальних архітектур, в яких використовуються радіочастотні та оптичні канали. Розглянуто багаторівневі механізми криптографічного захисту, призначені для забезпечення стійкості системи до глушіння, спуфінгу та скоординованих кібер атак.

Окрему увагу приділено інтеграції методів машинного навчання в керування мережею. Проведено оцінку ефективності алгоритмів прогнозування маршрутизації, вибору каналів на основі підкріплювального навчання та оптимізації топології за допомогою штучного інтелекту для зменшення затримки зв'язку та підвищення адаптивності мережі в динамічних умовах. Експериментальні результати підтверджують здатність інтелектуальних mesh систем підтримувати цілісність зв'язку при частковій відмові вузлів та виконувати автономне перемаршрутування в критично важливих для операції часових рамках.

Наголошено на тому, що бездротові сіткові мережі є критично важливою технологією для майбутніх військових, автономних робототехнічних та багатодоменних оперативних застосувань. Злиття інновацій в області апаратного забезпечення, сучасних платформ моделювання та управління мережами на основі штучного інтелекту створює основу для розробки стійких, масштабованих та готових до оперативного розгортання автономних систем зв'язку.

Ключові слова: бездротові mesh-мережі, децентралізований зв'язок, адаптивна маршрутизація, платформи UAV/UGV, периферійні обчислення.

Постановка проблеми. Інтенсивна трансформація сучасних комунікаційних мереж відбувається під вплив високодинамічних експлуатаційних середовищ, зокрема у військовій сфері, системах реагування на надзвичайні ситуації та автономних робототехнічних системах [1]. Сучасні військові та безпекові операції дедалі більше використовують розподілені технологічні екосистеми, до яких входять UAV, UGV, автономні сенсорні платформи та мобільні робототехнічні системи. Для таких систем потрібен надійний комунікаційний інфраструктурний комплекс, здатний стабільно функціонувати в умовах, за яких традиційна централізована інфраструктура зв'язку може бути недоступною, пошкодженою або навмисно виведеною з ладу засобами радіоелектронної боротьби.

Традиційні мережі бездротового зв'язку зазвичай базуються на стаціонарних елементах інфраструктури, таких як базові станції, централізовані маршрутизатори або супутникові шлюзи [2]. Хоча такі архітектури забезпечують високу пропускну здатність та структуроване керування, вони мають обмежену адаптивність під час роботи в умовах, за яких відбувається швидка зміна обстановки, яка характеризується мобільністю, порушенням роботи інфраструктури та перешкодами в електромагнітному спектрі. У сучасних бойових ситуаціях інфраструктура зв'язку часто стає однією з головних цілей ворожих дій, що значно знижує надійність централізованих мережевих архітектур.

У цьому контексті бездротові mesh-мережі (WMN - Wireless Mesh Network) представляють перспективну модель зв'язку, здатну підтримувати децентралізовані, адаптивні та самоорганізовані мережеві структури [3]. WMN функціонують за розподіленою топологією, в якій мережеві вузли динамічно встановлюють багатоступеневі канали зв'язку, що дозволяє пакетам даних поширюватися через проміжні вузли без опори на централізований маршрутизатор. Такі мережі мають властиві їм характеристики, зокрема самоконфігурацію, здатність до самовідновлення, масштабованість та високу відмовостійкість, що робить їх особливо придатними для середовищ, критичних для виконання місій.

Значення цих властивостей стає особливо очевидним у військових та автономних робототехнічних застосуваннях [4]. Наприклад, сучасні бойові операції часто передбачають залучення різномірних груп робототехнічних систем, включаючи розвідувальні рої UAV, автономні наземні транспортні засоби, які забезпечують логістичну підтримку, та

розподілені сенсорні мережі, котрі контролюють стратегічні райони. Надійна координація між цими системами передбачає постійний обмін даними попри мобільність, перешкоди у навколишньому середовищі та потенційні перешкоди для сигналу. WMN надають можливість цим розподіленим платформам формувати адаптивні комунікаційні структури, де кожен вузол одночасно виконує функції хоста та ретранслятора.

Крім того, концепція різнопланових військових операцій створює додаткові завдання для систем зв'язку [5]. Сучасні умови операцій об'єднують багато рівнів, включаючи наземні платформи, повітряні засоби, супутникові системи та морські ресурси. Ця багаторівнева архітектура утворює складні системи зв'язку, де вузли мають різнопланові можливості, дальність передачі та обчислювальні ресурси. За таких умов традиційні протоколи зв'язку часто не можуть забезпечити стабільне з'єднання через зміну топології та фрагментацію мережі.

Бездротові mesh-мережі пропонують ефективне рішення цих задач, забезпечуючи розподілені механізми маршрутизації та формування адаптивної топології [6]. У mesh-архітектурі автономні платформи можуть динамічно переконфігурувати шляхи зв'язку, обходячи пошкоджені вузли або заблоковані канали зв'язку. Така гнучкість гарантує обмін інформацією навіть за умови часткового погіршення стану мережі. Ця особливість є надзвичайно важливою для забезпечення ситуаційної обізнаності, координації автономних систем та функціонування каналів управління та контролю під час операцій у реальному часі.

Іншим важливим аспектом, що підкреслює актуальність технологій WMN, є зростаюча інтеграція пристроїв Інтернету речей (IoT) та систем периферійних обчислень у військову інфраструктуру [7]. Сучасні сенсорні мережі, розгорнуті в розвідувальних місіях, генерують великі обсяги даних, які необхідно ефективно обробляти та передавати. У централізованих архітектурах зв'язку цей процес може спричиняти значну затримку та створювати вузькі місця. Архітектури мереж типу mesh у поєднанні з розподіленими обчислювальними можливостями забезпечують локальну обробку даних та ефективне поширення даних між вузлами мережі.

Попри перспективні можливості бездротових mesh-мереж, низка фундаментальних завдань залишається невирішеною. Зростаюча складність сучасних систем зв'язку породжує проблеми, пов'язані з масштабованістю мережі, оптиміза-

цією маршрутизації, розподілом ресурсів, зменшенням перешкод та кібербезпекою. Крім того, інтеграція гетерогенних автономних платформ потребує нових протоколів зв'язку, здатних підтримувати різноманітні експлуатаційні вимоги, зберігаючи при цьому низьку затримку та високу надійність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стрімкий розвиток технологій бездротового зв'язку сприяв широким дослідженням моделей децентралізованих мереж, здатних підтримувати динамічні мережі зв'язку, які не залежать від інфраструктури [8]. Серед цих моделей бездротові mesh-мережі (WMN) привернули значну увагу науковців завдяки своїй спроможності створювати адаптивні багатоступеневі структури зв'язку, здатні ефективно функціонувати в умовах мобільності вузлів, фрагментації мережі та обмеженої доступності інфраструктури. Попередні дослідження мереж типу “mesh” зосереджувалися переважно на цивільних застосуваннях, таких як розширення широкосмугового доступу, комунікаційні платформи «розумних міст» та розподілені сенсорні мережі. Однак останні технологічні та геополітичні події значно підвищили важливість технологій WMN у системах оборони, автономній робототехніці та відмовостійких тактичних комунікаційних мережах.

Однією з фундаментальних характеристик, на якій акцентували увагу в попередніх дослідженнях, є самоорганізований характер мереж типу “mesh”, де вузли мережі динамічно формують канали зв'язку та колективно підтримують функціональність маршрутизації без централізованої координації. Ця властивість дозволяє мережам типу “mesh” підтримувати зв'язок навіть у разі виходу з ладу окремих вузлів або недоступності частин топології мережі. Початкові архітектурні концепції WMN значною мірою базувалися на стаціонарних маршрутизаторах типу “mesh”, які підтримували стаціонарних клієнтів. Пізніші розробки запровадили гібридні архітектури мереж, інтегруючи як стаціонарні, так і мобільні вузли, що значно розширило можливості застосування цих мереж у високодинамічних умовах.

Важливу частину досліджень було присвячено розробці ефективних протоколів маршрутизації для мереж [9]. Традиційні підходи до маршрутизації, розроблені для мобільних мереж ad-hoc (MANET), такі як Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) та Dynamic Source Routing (DSR), спочатку були адаптовані для мережевих середовищ. Ці протоколи базуються на реактивних

механізмах виявлення маршрутів, де маршрути встановлюються лише тоді, коли потрібна комунікація. Хоча такий підхід зменшує навантаження на маршрутизацію в мережах з низькою щільністю, він може спричинити затримку під час встановлення маршруту, що може бути проблематичним у додатках, де час має критичне значення.

Для усунення цих обмежень були запроваджені проактивні протоколи маршрутизації, такі як Optimized Link State Routing (OLSR) [10]. OLSR підтримує оновлені таблиці маршрутизації за допомогою періодичних повідомлень обміну топологією, що забезпечує швидше встановлення маршруту за рахунок збільшення трафіку управління. Також були запропоновані гібридні протоколи маршрутизації, які поєднують реактивні та проактивні механізми, з метою збалансування швидкості реагування мережі та навантаження на комунікацію. Такі гібридні рішення є особливо актуальними для мереж, які складаються з гетерогенних вузлів з різними обчислювальними можливостями та діапазонами зв'язку.

Останні тенденції в наукових дослідженнях дедалі більше зосереджуються на адаптивних механізмах маршрутизації, здатних реагувати на динамічні зміни топології мережі, інтерференцію сигналів та мобільність вузлів [11]. Ці адаптивні підходи часто поєднують оцінку якості каналу зв'язку в режимі реального часу та методи прогнозного моделювання для покращення рішень щодо маршрутизації. Інтеграція алгоритмів машинного навчання в механізми маршрутизації є одним із нових напрямків досліджень, спрямованих на підвищення адаптивності та продуктивності мережі в надзвичайно складних середовищах.

Інша важлива область досліджень стосується багатошарових структур зв'язку, яка об'єднує повітряні, наземні та супутникові комунікаційні платформи [12]. Такі архітектури часто описують у рамках інтегрованих мереж «космос–повітря–земля» (SAGIN), де канали зв'язку між супутниками, UAV та наземними вузлами утворюють ієрархічну систему зв'язку. У цьому контексті технології мереж типу “mesh” забезпечують гнучку основу для встановлення зв'язку між різнорідними вузлами, розташованими на різних висотах та з різним рівнем мобільності.

Особлива увага приділяється використанню ретрансляторів зв'язку на базі UAV, які можуть динамічно розширювати покриття мережі та відновлювати зв'язок у районах з перебоями. UAV, оснащені модулями мережевого зв'язку, можуть виступати як повітряні ретрансляційні

вузли, створюючи тимчасові коридори зв'язку між наземними підрозділами або забезпечуючи зв'язок у регіонах, де наземна інфраструктура зв'язку була зруйнована. Такі підходи активно досліджуються в сучасних дослідженнях систем зв'язку для реагування на надзвичайні ситуації та військових тактичних мереж.

Поява автономних робототехнічних систем, включаючи рої UAV і платформи UGV, ставить додаткові вимоги до комунікаційних мереж [13]. Такі системи потребують зв'язку з низькою затримкою для спільного навігації, розподіленого зондування та скоординованого виконання місій. Дослідження в галузі робототехніки роїв підкреслюють необхідність масштабованих архітектур зв'язку, спроможних підтримувати десятки або навіть сотні взаємопов'язаних робототехнічних агентів. Мережі типу mesh пропонують ефективне рішення, розподіляючи комунікаційне навантаження між численними вузлами та усуваючи єдині точки відмови.

Інший важливий напрямок досліджень пов'язаний з інтеграцією периферійних обчислень та розподіленої обробки даних у мережі mesh. Периферійні обчислення дозволяють виконувати обчислювальні завдання локально на вузлах мережі, зменшуючи потребу в централізованій обробці даних та мінімізуючи затримки зв'язку. У військових застосуваннях ця здатність забезпечує обробку в реальному часі даних датчиків, зібраних розвідувальними платформами UAV або наземними системами спостереження. Таким чином, поєднання периферійних обчислень з мережами mesh утворює технологічну основу для децентралізованих інфраструктур обробки інформації.

Постановка завдання. З огляду на стрімкий розвиток технологій бездротових мереж з mesh-структурою (WMN) та їхній значний потенціал подвійного призначення, основною метою цього дослідження є критичний аналіз сучасних розробок із особливим акцентом на їхній застосовності у військовій та оборонній сферах. Незважаючи на значний потенціал архітектур WMN у цивільних сферах – зокрема в інфраструктурі «розумних міст», промислових системах Інтернету речей та системах зв'язку для реагування на надзвичайні ситуації – найбільш актуальні наукові та технологічні завдання виникають у військовій сфері, де надійність, оперативна стійкість та адаптивна реконфігурація в умовах протидії мають першочергове значення.

Відповідно, дане дослідження переслідує кілька взаємопов'язаних цілей:

- аналіз концептуальних та архітектурних основ бездротових мереж, з ціллю з'ясувати, як децентралізовані, самоорганізовані механізми зв'язку можуть бути адаптовані для підтримки військових місій – включаючи розвідку, спостереження та розвідку, скоординовані багаторівневі операції, автономний супровід конвоїв та завдання ретрансляції зв'язку, які здійснюються в умовах електронних перешкод або відсутності зв'язку;

- проведення систематичного огляду сучасних апаратних платформ та фреймворків для мережевого моделювання, з метою проведення оцінки їхньої технологічної зрілості та готовності до широкомасштабного оперативного розгортання у складних сценаріях з високою мобільністю;

- визначити основні невирішені технічні завдання, які обмежують перехід від експериментальних прототипів mesh-мереж до оперативно розгортаємих систем оборонного зв'язку. До них належать: забезпечення надійної адаптивної маршрутизації в умовах високої мобільності вузлів та частих змін топології; підтримка безпечного та стійкого зв'язку за наявності загроз електронної війни, таких як глушіння та спуфінг; досягнення масштабованого керування мережею в гетерогенних групах вузлів, які включають UAV, UGV та розподілені масиви датчиків; а також підтримка зв'язку під час тривалих операцій з обмеженими енергетичними ресурсами.

Нарешті, у роботі оцінюються перспективні напрямки досліджень – включаючи алгоритми маршрутизації, доповнені машинним навчанням, інтеграцію периферійних та хмарних обчислень, архітектури багатопланових інтегрованих мереж “космос-повітря-земля” (SAGIN - space-air-ground integrated network) та протоколи широкосмугового зв'язку наступного покоління - які мають значний потенціал для подолання поточних обмежень розгортання військових WMN.

Виклад основного матеріалу. Бездротові мережі типу “mesh” ґрунтуються на принципі розподіленої комунікації, де кожен вузол одночасно виконує функції хоста та маршрутизатора. Ця подвійна функціональність дозволяє вузлам мережі пересилати пакети даних для сусідніх вузлів, утворюючи багатоступеневі шляхи зв'язку по всій мережі. Такий підхід усуває необхідність у централізованій інфраструктурі та дозволяє топології мережі динамічно розвиватися у міру переміщення вузлів або приєднання до мережі нових вузлів.

У військових умовах mesh-мережі можуть складатися з різних типів вузлів зв'язку, вклю-

чаючи мобільні командні пункти, ретрансляційні платформи UAV, наземні роботизовані підрозділи та розподілені сенсорні пристрої. Ко-жен з цих елементів сприяє формуванню топології зв'язку, яка постійно адаптується до оперативних умов. Наприклад, коли UAV входить у зону проведення розвідки, він може тимчасово виконувати роль повітряного ретрансляційного вузла, розширюючи радіус дії наземних підрозділів, що діють у місцевості, де прямий радіозв'язок обмежений.

Подібна розподілена архітектура надає кілька критично важливих переваг для військових систем зв'язку. По-перше, відсутність централізованих вузлів управління значно підвищує стійкість мережі до цілеспрямованих атак або руйнування інфраструктури. По-друге, багатоступеневий зв'язок дозволяє мережі розширити покриття за межі прямої дальності передачі окремих радіостанцій. По-третє, динамічна реконфігурація маршрутів дозволяє мережі підтримувати зв'язок навіть тоді, коли певні вузли стають недоступними.

Впровадження платформ UAV та UGV у архітектури мережевої комунікації призвело до появи концепції багаторівневих мережевих систем, в яких комунікаційні вузли функціонують на різних просторових рівнях оперативного середовища. Наземні вузли зазвичай утворюють основну комунікаційну магістраль, тоді як повітряні вузли забезпечують динамічне розширення зони покриття та створення комунікаційних мостів.

Платформи UAV, оснащені модулями ретрансляції зв'язку, можуть значно покращити мережеву зв'язність, забезпечуючи канали зв'язку в межах прямої видимості на великі відстані. Повітряні вузли особливо ефективні в середовищах зі складним рельєфом, таких як міські райони, ліси або гірські регіони, де наземні канали зв'язку можуть бути перекриті.

У таких архітектурах UAV функціонують не лише як розвідувальні платформи, а й як динамічні ретранслятори зв'язку, здатні змінювати своє положення для підтримки оптимальної мережевої зв'язності. Корегуючи траєкторії польоту, UAV можуть компенсувати фрагментацію мережі, спричинену мобільністю вузлів або перешкодами в навколишньому середовищі.

З іншого боку, платформи UGV часто працюють ближче до зони бойових дій і можуть нести додаткове комунікаційне обладнання, здатне підтримувати передачу даних з високою пропускну здатністю. Такі наземні платформи можуть слугувати локальними комунікаційними вузлами, які з'єднують розподілені сенсорні мережі, роботи-

зовані розвідувальні модулі та термінали управління.

Утворена таким чином структура зв'язку формує тривимірну комунікаційну мережу, де інформація проходить як через горизонтальні, так і вертикальні рівні зв'язку. Такі архітектури значно підвищують надійність та гнучкість тактичних систем зв'язку.

Як наголошувалось, однією з головних технічних проблем, пов'язаних із бездротовими мережами типу “mesh”, є розробка алгоритмів маршрутизації, здатних підтримувати стабільні канали зв'язку в середовищах, що характеризуються високою мобільністю та частими змінами топології. Традиційні підходи до маршрутизації, розроблені для статичних мереж, часто не здатні ефективно адаптуватися до таких умов.

Механізми адаптивної маршрутизації, розроблені для мереж типу “mesh”, використовують різні метрики для оцінки якості каналів зв'язку між вузлами [14]. Ці метрики можуть включати силу сигналу, рівень втрати пакетів, затримку передачі та моделі мобільності вузлів. Постійно відстежуючи ці параметри, алгоритми маршрутизації можуть динамічно обирати оптимальні канали зв'язку для передачі даних.

Сучасні дослідження все частіше вивчають інтеграцію методів машинного навчання в алгоритми маршрутизації з метою покращення їхніх прогностичних можливостей. Наприклад, прогностичні моделі можуть аналізувати попередні моделі зв'язку, щоб передбачити погіршення якості каналу та завчасно перенаправити трафік даних через більш надійні канали.

Такі інтелектуальні механізми маршрутизації є особливо корисними у військових системах зв'язку, де переривання зв'язку може поставити під загрозу виконання місії. Прогнозуючи нестабільність мережі та відповідно адаптуючи стратегії маршрутизації, mesh-мережі можуть підтримувати безперервний зв'язок навіть у дуже динамічних умовах.

Слід зазначити, що ключовою вимогою до військових систем зв'язку є здатність зберігати боєздатність за умов умисних перешкод зв'язку та електронної війни. Архітектури мереж типу “mesh” за своєю суттю мають низку особливостей, які підвищують їхню стійкість у таких умовах.

Оскільки mesh-мережі підтримують кілька альтернативних шляхів зв'язку, вихід з ладу одного каналу зв'язку не обов'язково призводить до порушення роботи всієї мережі. При впливі перешкод або глушіння на конкретний вузол або

канал зв'язку алгоритми маршрутизації можуть автоматично перенаправляти трафік даних через альтернативні вузли або частотні канали.

Крім того, сучасні mesh-мережеві системи часто містять механізми частотної адаптивності, завдяки чому вузли можуть динамічно змінювати робочі частоти у відповідь на виявлення перешкод. Такі можливості значно знижують ефективність методів вузькосмугового глушіння.

Іншим важливим аспектом стійкості мережі є механізми розподіленого прийняття рішень, де кожен вузол бере участь у підтримці робочого стану мережі. На відміну від централізованих архітектур зв'язку, де вихід з ладу одного вузла управління може вивести з ладу всю систему, сіткові мережі розподіляють завдання керування мережею між декількома вузлами, зменшуючи вразливість до цілеспрямованих атак.

Протоколи бездротових мереж типу “mesh” мають важливе значення для розгортання розподілених сенсорних мереж, призначених для розвідки, спостереження та оцінки обстановки. Сучасні військові операції дедалі більше використовують мережі різнотипних датчиків, здатних контролювати умови навколишнього середовища, виявляти рух та ідентифікувати потенційні загрози.

У таких системах сенсорні вузли взаємодіють між собою за допомогою протоколів мереж типу “mesh”, утворюючи разом розподілену сенсорну інфраструктуру. Дані, зібрані окремими датчиками, передаються через проміжні вузли, поки не досягають командних центрів або блоків обробки даних.

Інтеграція розвідувальних платформ UAV з наземними сенсорними мережами ще більше розширює можливості таких систем [15]. UAV можуть збирати зображення з високою розділь-

ною здатністю та ретранслювати дані датчиків з віддалених місць до командних підрозділів через канали зв'язку “mesh”. Такий підхід забезпечує ситуаційну обізнаність у реальному часі навіть у районах, де прямий зв'язок з командними центрами інакше був би неможливим.

Крім того, інтеграція можливостей периферійних обчислень у вузли сіткової мережі дозволяє здійснювати попередню обробку даних на місцевому рівні. Це зменшує обсяг переданих даних та прискорює процеси прийняття рішень у ситуаціях, де час має критичне значення.

Висновки. Бездротові mesh-мережі (WMN) є базовою платформою для надійних, децентралізованих архітектур військового зв'язку, які забезпечують самоорганізовану, відмовостійку взаємодію між гетерогенними автономними платформами – зокрема, ретрансляційними вузлами UAV, UGV та розподіленими масивами датчиків. Розподілена топологія WMN робить їх за своєю суттю стійкими до цілеспрямованих електромагнітних перешкод, а майбутня інтеграція адаптивної маршрутизації з використанням машинного навчання ще більше покращує здатність до автономної реконфігурації в умовах протидії. Однак перехід від експериментальних прототипів до оборонних систем, придатних для оперативного розгортання, залишається обмеженим через невирішені проблеми масштабованої маршрутизації в топологіях з високою мобільністю, безпечного з'єднання, стійкого до перешкод, стійкого керування та міжплатформної сумісності протоколів – питання, вирішення яких за допомогою периферійних обчислень, широкосмугових протоколів зв'язку та керування мережею на основі штучного інтелекту визначає основний вектор майбутніх досліджень у цій галузі.

Список літератури:

1. Akyildiz I., Wang X., Wang W. Wireless Mesh Networks: A Survey, Computer Networks, vol. 47, no. 4, 2005, pp. 445–487.
2. Gupta P., Kumar P. The Capacity of Wireless Networks, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 46, no. 2, 2000, pp. 388–404.
3. Bruno R., Conti M., Gregori E. Mesh Networks: Commodity Multihop Ad Hoc Networks, IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 3, 2005, pp. 123–131.
4. Bekmezci I., Sahingoz O., Temel S. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey, Ad Hoc Networks, vol. 11, no. 3, 2013, pp. 1254–1270.
5. Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone Networks: Communications, Coordination, and Sensing, Ad Hoc Networks, vol. 68, 2018, pp. 1–15.
6. Clausen T., Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), RFC 3626, IETF, 2003.
7. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge Computing: Vision and Challenges, IEEE Internet of Things Journal, vol. 3, no. 5, 2016, pp. 637–646.
8. Perkins C., Royer E. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing, Proceedings of IEEE WMCSA, 1999, pp. 90–100.
9. Johnson D., Maltz D., Hu Y. The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks, IETF RFC 4728, 2007.
10. Clausen T., Jacquet P., Laouiti A. Optimized Link State Routing Protocol Performance in Mobile Ad Hoc Networks, IEEE INMIC Conference, 2001, pp. 57–62.

11. Jiang J., Han G., Guizani M. Machine Learning-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 1, 2021, pp. 445–472.
12. Zhang N., Zhang S., Yang P., Al-Dhahir N. Software Defined Space-Air-Ground Integrated Vehicular Networks: Challenges and Solutions, *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 7, 2017, pp. 101–109.
13. Chung S., Paranjape A., Dames P., Shen S., Kumar V. A Survey on Aerial Swarm Robotics, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, 2018, pp. 837–855.
14. De Couto D., Aguayo D., Bicket J., Morris R. A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing, *Wireless Networks*, vol. 11, no. 4, 2005, pp. 419–434.
15. Guo H., Liu J., Zhang J. UAV-Enabled Intelligent Transportation Systems for the Smart City: Applications and Challenges, *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 10, 2018, pp. 40–47.

Hurzhiy S.V. ASPECTS OF DECENTRALIZING THE COMMUNICATION SYSTEM FOR COORDINATING UAVs/UGVs IN THE PRESENCE OF RADIO FREQUENCY INTERFERENCE

This article presents a comprehensive analysis of current trends in the development and practical application of wireless mesh networks (WMNs) in the context of growing demands for fault-tolerant communication infrastructures capable of supporting next-generation autonomous systems. The focus is on the conceptual foundations of decentralized mesh network architectures, their functional capabilities, and prospects for integration with heterogeneous autonomous platforms, in particular unmanned aerial vehicles (UAVs) and unmanned ground vehicles (UGVs), as well as distributed sensor arrays. It has been established that WMN technology, based on the principles of self-organization, distributed routing, and functional redundancy, represents a new concept for enabling mass robotic communication in complex, dynamic operational environments.

The transition from traditional centralized communication infrastructures to decentralized network models, in which each node simultaneously performs the functions of a host and a repeater, is examined in detail. It has been established that this approach ensures network resilience even under conditions of significant node losses or deliberate disruption of the infrastructure, creating the prerequisites for real-time control and coordination. Particular attention is paid to adaptive routing protocols, including reactive, proactive, and hybrid mechanisms, upon which the flexibility and scalability of network communication systems are based. The results of simulations and experiments are discussed, confirming the ability of WMN architectures to rapidly reconfigure topology, dynamically select paths, and continuously relay data under conditions of active electronic warfare and interference.

Innovations in hardware platforms and computing systems are considered separately. The integration of UAV-based aerial relay nodes, multiprocessor edge computing modules, and hybrid communication equipment into a mesh network is described. The role of high-precision simulation environments is emphasized; these environments allow for the simulation of large-scale heterogeneous network topologies with full consideration of environmental conditions, thereby creating a robust foundation for porting protocols from simulation to operational hardware systems.

Significant attention is paid to communication security and the resilience of electronic systems. The applicability of ad-hoc network topologies, cognitive spectrum management, and multi-channel architectures utilizing radio frequency and optical channels is investigated. Multi-level cryptographic protection mechanisms designed to ensure system resilience against jamming, spoofing, and coordinated cyberattacks are examined.

Special attention is given to the integration of machine learning methods into network management. The effectiveness of predictive routing algorithms, channel selection based on reinforcement learning, and topology optimization using artificial intelligence is evaluated to reduce communication latency and improve network adaptability under dynamic conditions. Experimental results confirm the ability of intelligent mesh systems to maintain communication integrity during partial node failures and perform autonomous rerouting within time frames critical to the operation.

It is emphasized that wireless mesh networks are a critical technology for future military, autonomous robotic, and multi-domain operational applications. The convergence of innovations in hardware, modern simulation platforms, and AI-based network management creates the foundation for developing resilient, scalable, and operationally deployable autonomous communication systems.

Keywords: wireless mesh networks, decentralized communication, adaptive routing, UAV/UGV platforms, edge computing.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Катін П.Ю.

<https://orcid.org/0000-0002-2542-9976>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Яценко Д.В.

<https://orcid.org/0009-0004-8114-6112>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мішин О.В.

<https://orcid.org/0009-0008-4766-6324>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСОВИХ ЗАТРИМОК ПЕРЕДАЧІ ТА ОБРОБКИ GNSS-ДАНИХ У РІЗНИХ ФОРМАТАХ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ ІОТ

У роботі досліджено ефективність передачі навігаційних телеметричних повідомлень GNSS у системах Інтернету речей. Актуальність даного напрямку досліджень обумовлена широким використанням навігаційних систем моніторингу транспорту, робототехнічних платформ та інших IoT-застосувань, у яких необхідна оперативна передача координатних та телеметричних даних до серверних систем обробки. Навігаційні приймачі формують повідомлення відповідно до стандарту NMEA, які передаються у вигляді текстових ASCII-рядків та містять інформацію про координати об'єкта, швидкість руху, курс та час визначення позиції.

У сучасних IoT-системах передача таких повідомлень до серверної частини системи здійснюється за допомогою мережевих протоколів прикладного рівня, зокрема HTTP. Навігаційні повідомлення можуть передаватися як у сирому текстовому вигляді, так і у структурованих форматах представлення даних, зокрема JSON або у вигляді параметрів HTTP-запитів. Використання різних форматів представлення телеметричних повідомлень може створювати додаткові накладні витрати, пов'язані із серіалізацією, кодуванням та синтаксичним аналізом даних під час їх обробки серверною системою.

У роботі проведено експериментальне дослідження впливу різних форматів передачі GNSS-повідомлень на затримку обробки HTTP-запитів у серверному застосунку. Для проведення експерименту було розроблено програмний стенд, що моделює процес передачі телеметричних даних від клієнтського пристрою до серверної частини системи. Було сформовано схему проведення експерименту та обробку даних. Програмний стенд реалізовано у вигляді двох складових, а саме: веб-сервісу на базі фреймворку Django та клієнтського модуля для формування HTTP-запитів на основі бібліотеки requests мови програмування Python.

У рамках дослідження виконано порівняльний аналіз кількох способів передачі телеметричних повідомлень, зокрема raw NMEA, application/json, application/x-www-form-urlencoded, multipart/form-data та експериментального текстового формату TOON. Для кожного способу передачі виконано серію експериментальних вимірювань часу обробки HTTP-запитів із формуванням статистичної вибірки обсягом 300 спостережень. Обробка результатів здійснювалася із використанням методів математичної статистики, зокрема обчислення вибіркового середнього, мінімального та максимального значень, а також вибіркового середньоквадратичного відхилення. Проведено дослідження на відповідність вибірок відомим законам розподілу.

Отримані результати показали, що передача сирого NMEA-повідомлення забезпечує найменшу затримку обробки запитів, оскільки не потребує додаткових операцій серіалізації та перетворення

структури даних. Формати JSON та TOON демонструють близькі значення затримки, тоді як формати *application/x-www-form-urlencoded* та *multipart/form-data* характеризуються більшими накладними витратами під час обробки повідомлень. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні IoT-систем навігаційного моніторингу, у яких важливим є забезпечення мінімальної затримки передачі телеметричних даних та ефективної обробки GNSS-повідомлень.

Ключові слова: GNSS, NMEA, IoT, телеметрія, HTTP, JSON, передача даних, затримка передачі, навігаційний моніторинг, математична статистика.

Постановка проблеми. У сучасних комп'ютерних мережах важливу роль відіграють технології IoT (Internet of Things, Інтернет речей), що забезпечують взаємодію їх складових. Одним із важливих елементів IoT є системи навігаційного моніторингу, що використовують приймачі GNSS (Global Navigation Satellite System, глобальна навігаційна супутникова система) для визначення координат об'єктів, швидкості їх руху та отримання точного часу.

Приймачі формують навігаційні повідомлення відповідно до стандарту NMEA (National Marine Electronics Association, стандарт навігаційних повідомлень). Вони передаються у вигляді текстових ASCII-рядків та містять інформацію про координати, швидкість, курс руху, час, тощо.

У IoT-архітектурах навігаційні повідомлення передаються від пристроїв до серверних систем обробки даних через мережеві протоколи прикладного рівня. Найбільш поширеними протоколами є HTTP (HyperText Transfer Protocol, протокол передачі гіпертексту) та MQTT (Message Queuing Telemetry Transport, протокол телеметричного обміну повідомленнями). Формати представлення навігаційних даних можуть мати текстовий вигляд (сирі дані, raw NMEA) і структурований формат серіалізації, зокрема JSON (JavaScript Object Notation, формат представлення структурованих даних). Може застосовуватися у вигляді параметрів HTTP-запитів.

Процеси серіалізації, кодування та обробки даних створюють затримку інформації під час передавання. У системах управління на основі технологій IoT затримка повідомлень може мати негативний вплив на роботу системи у цілому. Таким чином, актуальною є задача дослідження залежності часу затримки передачі повідомлень від формату даних GNSS.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На теперішній час спостерігається стрімкий розвиток систем IoT та їх широке використання у задачах моніторингу транспорту, логістики, навігації та керування рухомими об'єктами. Важливим елементом IoT є система передачі телеметричних даних від периферійних пристроїв до серверних

систем обробки та особливості протоколів передачі даних, що описані у [1-5, 10, 11, 13, 14].

Важливим фактором ефективності передачі є формат представлення даних. Зокрема у веб-сервісах широко застосовується текстовий формат JSON [1], який забезпечує зручність інтеграції з програмними застосунками. Альтернативою можуть виступати більш компактні формати, наприклад CBOR [3], що дозволяють зменшити обсяг передаваних повідомлень.

Для побудови серверної частини IoT-систем широко використовуються сучасні веб-фреймворки, наприклад Django [6], що забезпечують швидку розробку серверних застосунків та підтримку різних форматів обміну даними. Широко використовуються навігаційні супутникові системи GNSS, що формують повідомлення стандарту NMEA-0183 [4].

Передача телеметричних даних у системах Інтернету речей може здійснюватись з використання протоколів HTTP або MQTT. Протокол MQTT визначений стандартом OASIS [11] та широко використовується у IoT-системах. Дослідження ефективності використання MQTT у IoT-системах наведено у роботі [13], де розглянуто можливості застосування цього протоколу.

У [14] наведено порівняльний аналіз протоколів MQTT та HTTP з точки зору ефективності передачі даних у IoT-застосуваннях. Автори показують, що текстова структура HTTP-повідомлень і значний обсяг службових заголовків можуть призводити до збільшення обсягу передаваних даних.

Таким чином, аналіз існуючих наукових досліджень показує, що значна увага приділяється архітектурі IoT-систем, мережевим протоколам передачі даних та програмній архітектурі вбудованих пристроїв.

Водночас у науковій літературі недостатньо досліджено вплив різних форматів представлення GNSS-повідомлень на часову затримку. Відсутні експериментальні дослідження, у яких проводиться порівняння затримок передачі повідомлень GNSS у різних форматах представлення даних (raw NMEA, JSON, *application/x-www-form-urlencoded*, *multipart/form-data*).

Відомі роботи [12], у яких вирішуються питання щодо реалізації і використання методики дослідження затримок обчислення у мікроконтролерних системах але ця методологія потребує подальшого розвитку для вирішення мережових завдань.

Існує багато сучасних робіт із математичної статистики [6-9, 15], що дають можливість розвинути результати роботи [12] для дослідження часових затримок передачі GNSS-повідомлень у IoT-системах.

Постановка завдання. Метою статті є експериментальне дослідження часу передачі (затримки) навігаційних GNSS-повідомлень у системах Інтернету речей при використанні різних форматів представлення даних у HTTP-запитах та статистична обробка цих результатів.

Експериментальна програмна архітектура та обробка результатів. Розроблена архітектура експериментальної системи, що побудована за клієнт-серверною архітектурою та складається з таких основних компонентів:

- модуль генерації телеметричних даних;
- клієнтський модуль формування HTTP-запитів;
- серверний модуль приймання та обробки даних;
- модуль збору та статистичної обробки результатів.

У роботі досліджується передача телеметричних повідомлень, сформованих на основі стандарту NMEA, з використанням кількох форматів представлення даних. Основною метрикою оцінювання ефективності є затримка доставки повідомлення від клієнтського пристрою до серверного застосунку.

Обмеження на проведення експерименту наступні: дослідження виконано у локальному програмному середовищі, використана операційна система загального призначення, дослідження провадилися на одній робочій машині без урахування затримок глобальної мережі передачі даних.

Обробка результатів експерименту на першому етапі передбачала:

отримання з використанням програмної архітектури вибірок часу затримки для різних форматів передавання даних, кількість елементів у вибірках дорівнювала 300, оскільки система вважається априорі технічно справною, введено припущення про нормальний закон розподілу вибірки;

далі здійснювалася типова статистична обробка вибірок, приклад методології наведений у [12], на

завершальному етапі дослідження перевірялась відповідність розподілу у вибірках нормальному закону.

Виклад основного матеріалу. Наведемо опис архітектури експериментальної системи та призначення її основних складових. До них належить модуль генерації телеметричних даних, що формує тестові GPS-повідомлення у форматі NMEA.

Клієнтський модуль реалізовано мовою програмування Python з використанням бібліотеки requests. Його основною функцією є формування та відправлення HTTP-запитів до серверного додатку у різних форматах передачі даних.

Для кожного формату клієнтський модуль формує відповідний HTTP-запит та передає телеметричні дані серверу. Серверний модуль реалізовано у вигляді веб-додатку на базі фреймворку Django.

Сервер приймає HTTP-запити, виконує їх синтаксичний аналіз відповідно до формату передачі даних та здійснює обробку отриманої телеметричної інформації. У ході експерименту для кожного запиту фіксувався час його обробки сервером. Отримані значення часу обробки використовувалися для формування статистичної вибірки.

Статистична обробка результатів експерименту виконувалася із використанням бібліотеки Pandas, яка забезпечує зручні засоби роботи з табличними даними та дозволяє обчислювати основні статистичні характеристики вибірки, такі як середнє значення, мінімум, максимум та середньоквадратичне відхилення.

Таким чином, розроблена експериментальна система дозволяє моделювати процес передачі телеметричних даних у різних форматах та виконувати порівняльний аналіз ефективності їх обробки серверною системою.

Затримка обробки запиту визначалася як інтервал часу між моментом відправлення HTTP POST-запиту клієнтом та моментом отримання відповіді сервера. Для вимірювання часу використовувалася високоточна функція `time.perf_counter()`.

Дослідженню підлягали такі формати передачі даних:

- raw NMEA-потік (`text/nmea`);
- `application/json`;
- експериментальний текстовий формат TOON;
- `application/x-www-form-urlencoded`;
- `multipart/form-data`.

Для формату `application/json` клієнт виконує серіалізацію структури даних у текстовий формат JSON, а сервер – десеріалізацію та парсинг отриманого повідомлення, що потребує додаткових обчислювальних операцій під час обробки запиту.

Формат `application/x-www-form-urlencoded` передбачає кодування полів у вигляді послідовності параметрів `key=value&key=value` із можливим URL-екранізванням символів. Такий підхід збільшує обсяг переданих даних та потребує додаткового розбору ключів і значень на стороні сервера.

`Multipart/form-data` використовує механізм `boundary`-роздільників для інкапсуляції окремих частин повідомлення, кожна з яких містить службові заголовки, що створює додаткові накладні витрати при парсингу.

Експериментальний текстовий формат `TOON` передбачає компактне представлення структурованих даних із зменшенням синтаксичної надлишковості `JSON`, однак також потребує попереднього перетворення даних перед передачею.

У сирому режимі передавалося оригінальне `NMEA`-речення без попереднього перетворення. У структурованих режимах виконувалося виділення полів і формування контейнера передачі.

Для кожного формату передачі даних було сформовано статистичну вибірку обсягом $N = 300$ вимірювань. Повторення експерименту дозволяє зменшити вплив випадкових факторів та отримати більш достовірну оцінку часу обробки запитів.

Для статистичного аналізу результатів використовувалися такі характеристики вибірки:

Вибіркове середнє

Середній час обробки запитів для кожного формату передачі даних визначався за формулою:

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1)$$

де,

t_i – значення часу обробки i -го запиту;

N – кількість вимірювань.

Вибіркове середнє дозволяє оцінити типову затримку обробки запитів для відповідного формату передачі даних.

Мінімальне та максимальне значення

Для характеристики меж зміни часу обробки визначалися також мінімальне та максимальне значення вибірки

$$t_{\{min\}} = \min(t_1, t_2, \dots, t_N) \quad (2)$$

$$t_{\{max\}} = \max(t_1, t_2, \dots, t_N) \quad (3)$$

Ці показники дозволяють оцінити найкращий та найгірший випадок обробки запитів у рамках проведеного експерименту.

Вибіркове середньоквадратичне відхилення

Для оцінки розсіювання значень часу обробки запитів відносно середнього значення використовувалося вибіркове стандартне відхилення

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (4)$$

де,

$\bar{t}$ – вибіркове середнє значення часу обробки.

Стандартне відхилення характеризує стабільність роботи системи: чим менше значення σ , тим меншою є варіативність часу обробки запитів.

Результати дослідження зведені у таблицю 1, що містить формати передавання даних та результати статистичної обробки даних.

Результати таблиці 1 демонструють, що передача сирого `NMEA`-повідомлення забезпечує найменшу середню затримку та мінімальний обсяг переданих даних. Формати з попередньою адаптацією збільшують розмір `payload` та створюють додаткові накладні витрати на серіалізацію і розбір структури. Різниця між `JSON` та `TOON` знаходиться в межах статистичної похибки вимірювання у локальному стенді. Методи `form` та `multipart` характеризуються найбільшою затримкою через додаткове кодування та обробку полів.

Для візуалізації результатів експерименту на рис. 1 представлено графічне відображення таблиці 1.

У роботі [12] передбачався нормальний закон розподілу вибірок. Для більш точного оцінювання результатів і для виконання програми проведення експерименту було проведено окреме статистичне дослідження відповідності отриманих вибірок нормальному закону. Отже, відповідно до результатів, що наведені у [12] сформовано початкову гіпотезу про нормальний закон розподілу в експериментальних вибірках. Щільність нормального

Таблиця 1

Результати вимірювання затримки доставки (300 повторів)

Формат передачі	Середня затримка, мс	Мінімальна затримка, мс	Максимальна затримка, мс	Середньоквадратичне відхилення, мс
form	1.799304	1.410667	43.690584	2.668516
multipart	1.965303	1.573125	7.992958	0.745291
json	1.409744	1.249500	2.796708	0.140111
toon	1.606506	1.224667	17.171750	1.256161
raw_nmea	1.407530	1.230875	2.195667	0.117626

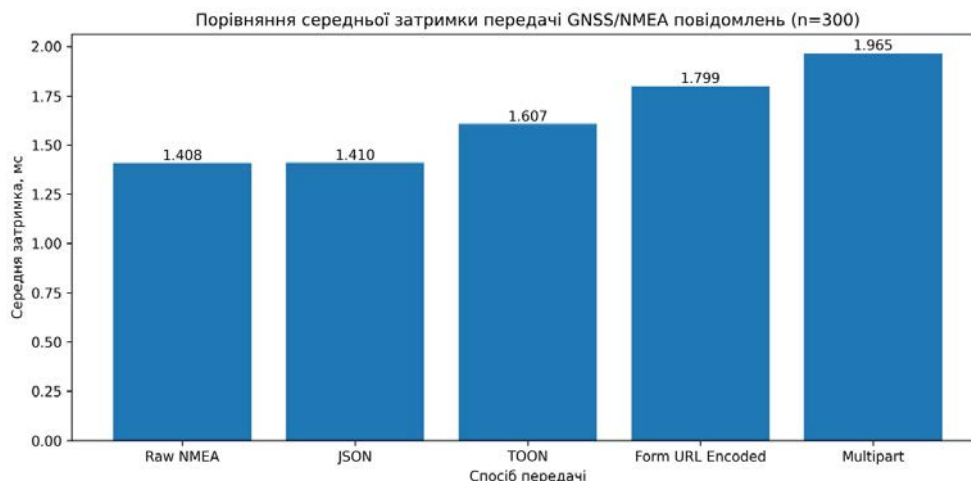


Рис. 1. Порівняння середньої затримки передачі GNSS/NMEA повідомлень для різних форматів

розподілу визначається наступною формулою [6-9, 15]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

де μ – середнє значення, σ – середньоквадратичне відхилення.

Цей розподіл має властивість симетрії відносно середнього значення, крім того, ця функція ніколи не досягає строго нуля.

Гіпотеза про нормальний розподіл затримок не підтвердилась. На рис.2 наведено гістограму розподілу вимірів для одного з форматів (TOON) та графіки різних розподілів. Графіки гістограми рис.2, вказують на часткову невідповідність розподілу у вибірці нормальному закону розподілу. Відповідно до рис.2 явно виражена несиметричність гістограми результатуючих вибірок. Це можна пояснити механізмом утворення затримки. Обмеження з лівого боку гістограми рис.2 обумовлено тим, що на виконання кожного кроку алгоритму потрібен певний мінімальний час. Саме це дає строге обмеження на мінімальне значення затримки.

Наявність поширення правого боку гістограми рис.2 обумовлено випадковими затримками обчислювальної системи та операційної системи, яка відповідно умов експерименту не є операційною системою реального часу. Саме ці умови впливають на випадковий характер і будуть збільшувати це значення.

Наявність строгого мінімуму та явну несиметричність розподілу відносно середнього значення більш точно моделюють гамма-розподіл та логарифмічний нормальний розподіл, формула

якого визначається виразом [6-9, 15]:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\beta x} \beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}, \quad (6)$$

де α , β – параметри розподілу. Гамма розподіл падає строго до нуля при $x=0$, і, додавши додатковий параметр зсуву, можна підігнати цей нуль відповідно до моделі затримки.

Також для математичного моделювання закону розподілу отриманих вибірок можна застосувати щільність логарифмічного нормального розподілу, що визначається наступним виразом [6-9, 15]:

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (7)$$

Як видно з назви, цей розподіл можна отримати, якщо прийняти, що логарифм випадкової величини має нормальний розподіл, з відповідними параметрами.

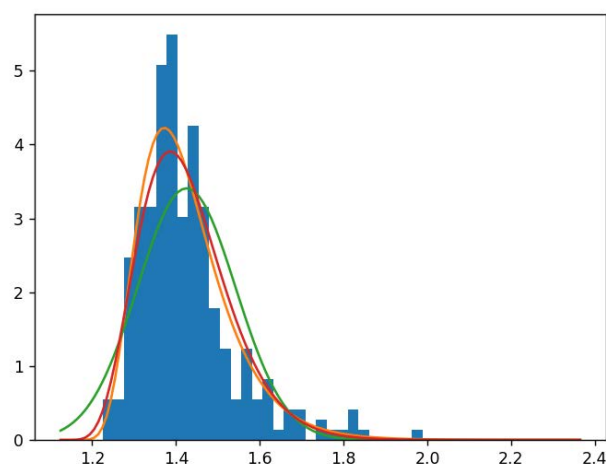


Рис. 2. Гістограма вимірів затримок, графік нормального розподілу(зелений), гамма-розподілу(червоний), та логарифмічного нормального розподілу(оранжевий)

Таким чином, наочно видно несиметричність гістограми та більш точна відповідність альтернативних розподілів. Для графічного порівняння відповідності двох різних розподілів як правило використовуються графіки Quantile-Quantile, або QQ-графіки [6-9, 15]. На такому графіку, кожна точка має координати, що відповідають певному квантилю для першого і другого розподілів. Для розподілів, наведених як множина вимірів, якщо кількість вимірів однакова, для цього достатньо відсортувати елементи цих множин в порядку зростання та, для кожного номера, поставити точку з координатами, що відповідають значенням елементів з цим номером. Для розподілів, наведених у вигляді функції щільності розподілу, цю функцію можна використати для обрахунку квантилів.

Результуючий графік порівнюється з прямою. Якщо порівняні розподіли однакові, точки графіка будуть лежати на прямій $y=x$. Якщо вони лежать на іншій прямій, це відповідає лінійній залежності двох розподілів. На рис.3 наведено порівняння графіків QQ-графіків для двох різних гіпотез розподілів. Більш точна відповідність лінії відповідає більшій точності гіпотези розподілу.

Крім цього, дослідження даних вказало на наявність аномально великих викидів в перших вимірах вибірки. Це пояснюється затримкою системи для виконання одноразових дій (виділення пам'яті, кешування і т.д.). Ці значення не є суттєвими для мети цієї роботи (порівняння різних форматів даних) і були відкинуті перед обчисленнями.

Хоча точний закон розподілу не підтверджено, використання обчислених значень (середнє, середньоквадратичне відхилення) є допустимим, з урахуванням вказаних вище особливостей. Побудова моделі випадкового процесу затримки і використання цієї моделі для підтвердження від-

повідності цього процесу одному з видів розподілів, є одним з напрямів подальшого дослідження.

Слід зазначити, що дослідження виконано в локальному середовищі, тому результати відображають сумарні накладні витрати формату передачі та серверної обробки, а не абсолютну мережеву затримку в реальних IoT-каналах. У розподілених системах із віддаленими вузлами різниця між підходами може змінюватися залежно від пропускної здатності каналу та частоти оновлення телеметрії.

Висновки. У роботі проведено експериментальне дослідження впливу формату передачі телеметричних даних на затримку обробки HTTP-запитів у серверній системі. Розроблено програмну архітектуру, що моделює процес передачі GNSS/NMEA повідомлень між клієнтським та серверним модулями.

За результатами експерименту встановлено, що передача сирого NMEA-повідомлення забезпечує мінімальні накладні витрати та найменшу затримку обробки. Формати передачі даних, що передбачають додаткову серіалізацію структури (JSON, TOON), створюють додаткові обчислювальні витрати на стороні клієнта та сервера.

За результатами досліджень не підтвердився нормальний закон розподілу у отриманих вибірках, що суперечить результатам [12], цей факт обґрунтований у вищевикладеному матеріалі. Також було виявлено, що розподіл у отриманих вибірках не відповідає відомим законам розподілу і як майбутній напрям дослідження передбачається отримання формули для закону розподілу у вибірках.

Отримані результати можуть бути використані під час проектування IoT-систем моніторингу, у яких важливими є мінімальна затримка передачі телеметрії та ефективність обробки GNSS-даних.

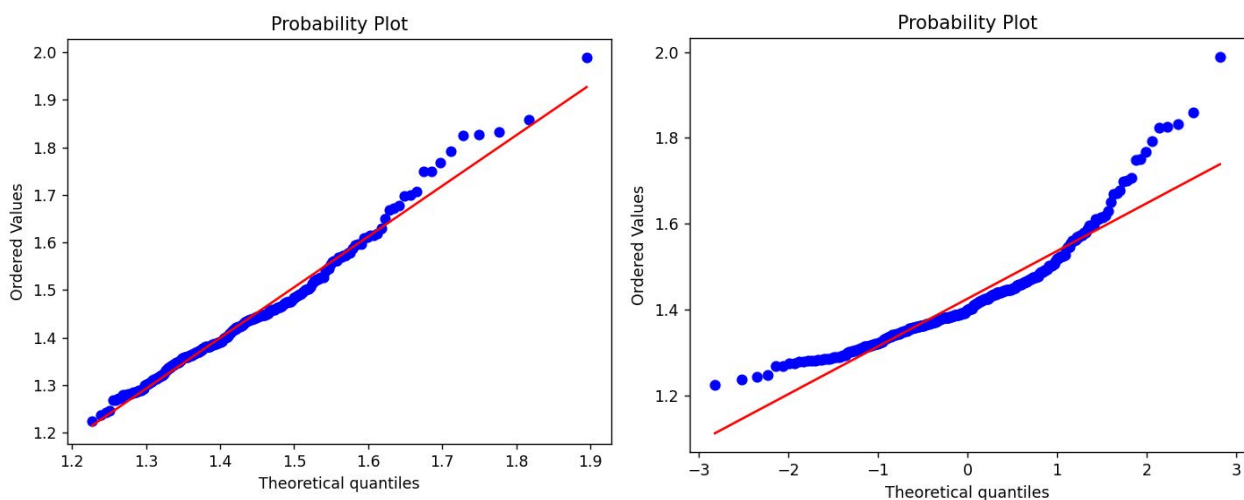


Рис. 3. QQ-графіки для логарифмічного нормального розподілу(зліва) та нормального розподілу(справа)

Список літератури:

1. Bray T. The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format : RFC 8259. Internet Engineering Task Force (IETF), 2017. 16 с. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8259> (дата звернення: 07.03.2026).
2. Fielding R. та ін. Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Message Syntax and Routing : RFC 7230. Internet Engineering Task Force (IETF), 2014. 89 с. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7230> (дата звернення: 07.03.2026).
3. Bormann C., Hoffman P. Concise Binary Object Representation (CBOR): RFC 8949. [Чинний від 2020-12]. Internet Engineering Task Force (IETF), 2020. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8949> (дата звернення: 07.03.2026).
4. NMEA 0183 Standard for Interfacing Marine Electronic Devices. Version 4.30. National Marine Electronics Association, 2023. URL: <https://www.nmea.org/nmea-0183.html> (дата звернення: 07.03.2026).
5. Al-Fuqaha A. та ін. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2015. Vol. 17, № 4. С. 2347-2376. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7123563> (дата звернення: 07.03.2026).
6. Mele A. Django 5 By Example: Build powerful and reliable Python web applications from scratch. 5th ed. – Birmingham: Packt Publishing, 2024. 822 p.
7. Горбачук В. М., Кушлик-Дивульська О. І. Теорія ймовірностей та математична статистика: підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 351 с.
8. Озеранський В. С., Крилик Л. В., Шевчук О. Ф. Теорія ймовірності та математична статистика для здобувачів спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»: електронний лабораторний практикум. Вінниця : ВНТУ, 2025. 113 с.
9. Донченко В. С., Сидоров М. В.-С. Теорія ймовірностей та математична статистика для соціальних наук : навч. посіб. Київ : Київський університет, 2015. 400 с.
10. Token-Oriented Object Notation (TOON) Specification. Version 3.0. 2025. URL: <https://toonformat.dev/> (дата звернення: 20.03.2026).
11. Banks A., Gupta R. MQTT Version 3.1.1 : OASIS Standard. OASIS Open, 2014. 81 p. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html> (дата звернення: 20.03.2026).
12. Катін П.Ю., Похиленко О.А., . Електрон. моделювання. 2021. Т. 43. № 2, с. 51-67 URL: https://web.archive.org/web/20210716145023id_/https://www.emodel.org.ua/images/em/43-2/43-2-5.pdf (дата звернення: 20.03.2026).
13. Sasaki Y., Yokotani T. Performance Evaluation of MQTT as a Communication Protocol in IoT. Advances in Technology Innovation. 2019. Vol. 4, № 1. P. 21-29.
14. Kadam S., Ghule S. Comparative Analysis of MQTT and HTTP Protocols for IoT Applications. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2023.
15. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посіб. Львів: ЛьвівДУВС, 2017. 292 с.

Katin P.Yu, Yatsenko D.V., Mishyn O.V. EXPERIMENTAL STUDY OF TRANSMISSION AND PROCESSING LATENCY OF GNSS DATA IN DIFFERENT DATA REPRESENTATION FORMATS FOR IOT SYSTEMS

This paper investigates the efficiency of transmitting GNSS navigation telemetry messages in Internet of Things (IoT) systems. The relevance of this research area is determined by the widespread use of navigation monitoring systems for transportation, robotic platforms, and other IoT applications in which the prompt transmission of coordinate and telemetry data to server-side processing systems is required. Navigation receivers generate messages according to the NMEA standard, which are transmitted as ASCII text strings and contain information about the object's coordinates, speed, course, and time of position determination.

In modern IoT systems, the transmission of such messages to the server side of the system is performed using application-layer network protocols, in particular HTTP. Navigation messages can be transmitted either in raw textual form or in structured data representation formats, such as JSON, or as parameters of HTTP requests. The use of different formats for representing telemetry messages may introduce additional overhead associated with data serialization, encoding, and syntactic parsing during their processing by the server system.

In this work, an experimental study of the influence of different GNSS message transmission formats on the delay of HTTP request processing in a server application was conducted. To conduct the experiment, a software testbed was developed that simulates the process of transmitting telemetry data from a client device to the server side of the system. An experimental procedure and data processing scheme were developed. The software testbed was implemented in the form of two components, namely: a web service based on the Django framework and a client module for generating HTTP requests using the Python requests library.

Within the scope of the study, a comparative analysis of several methods for transmitting telemetry messages was performed, including raw NMEA, application/json, application/x-www-form-urlencoded, multipart/form-data, and the experimental text-based format TOON. For each transmission method, a series of experimental measurements of HTTP request processing time was carried out, forming a statistical sample consisting of 300 observations. The results were processed using methods of mathematical statistics, including the calculation of the sample mean, minimum and maximum values, and the sample standard deviation. A study was conducted to determine the correspondence of the samples to known probability distribution laws.

The obtained results show that the transmission of raw NMEA messages provides the lowest request processing latency, since it does not require additional serialization operations or structural data transformations. The JSON and TOON formats demonstrate similar latency values, whereas the application/x-www-form-urlencoded and multipart/form-data formats introduce greater processing overhead. The results of this study can be applied in the design of IoT-based navigation monitoring systems where minimizing telemetry transmission delay and ensuring efficient processing of GNSS messages are important requirements.

Keywords: GNSS, NMEA, IoT, telemetry, HTTP, JSON, data transmission, transmission latency, navigation monitoring, mathematical statistics.

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Мовчан К.О.

<https://orcid.org/0000-0001-7881-466X>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У СТВОРЕННІ АДАПТИВНИХ ПРОТОКОЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ТАКТИЧНИХ МЕРЕЖ UAV ТА UGV

У статті розглядається проблематика забезпечення надійного зв'язку в гетерогенних системах розподілених автономних робототехнічних мереж, для яких характерний експоненціальний ріст кількості вузлів та їх інтеграція у критично важливу військову та цивільну інфраструктуру. Акцент робиться на високій мобільності вузлів UAV і UGV, динамічному характері змін топології мережі та обмежених спектральних і енергетичних ресурсах автономних платформ, що робить традиційні протоколи маршрутизації недостатніми та створює значні ризики для стабільності зв'язку в таких сферах, як розвідка, координація вогню, радіоелектронна боротьба та операції точного удару.

Проаналізовано сучасні тенденції розвитку загроз для зв'язку, зокрема цільове радіочастотне глушіння, електронне придушення та кібератаки на мережеву інфраструктуру, які часто залишаються невиявленими через відсутність інтегрованих адаптивних систем моніторингу. Особливу увагу приділено вразливостям централізованих архітектур зв'язку, де руйнування окремих вузлів призводить до каскадних мережеских збоїв, а також фрагментації робототехнічних екосистем, що ускладнює розгортання уніфікованих систем управління зв'язком.

Визначено ключові вектори погіршення якості зв'язку на різних рівнях архітектури розподіленої роботизованої мережі, що охоплюють фізичний канал, протокол маршрутизації та рівні взаємодії додатків. У статті розглядаються вразливості апаратного забезпечення на рівні радіоінтерфейсу, атаки на рівні мережі, включаючи заглушення, а також слабкі місця програмного забезпечення в механізмах прийняття рішень щодо маршрутизації в умовах неповної топологічної інформації.

Запропоновано багаторівневі підходи до адаптивної маршрутизації, які включають механізми на основі штучного інтелекту – алгоритми навчання з підкріпленням, глибокі нейронні мережі для прогнозування маршрутизації – поряд із самовідновлювальними мережевими архітектурами, розподіленим керуванням спектром та стратегіями зв'язку проти глушіння. Підкреслюється необхідність адаптивних підходів у контексті конкретних розгортань робототехніки, включаючи ройові системи, багатодоменні гетерогенні платформи та релейні інфраструктури на базі UAV. Зроблено висновок, що комплексний підхід до проектування протоколів зв'язку для розподілених робототехнічних мереж, який враховує багатопшаровість мережі, специфічні для платформи експлуатаційні вимоги та обмеження обчислювальних ресурсів, має критичне значення. Формулювання чітко структурованої класифікації обмежень маршрутизації в поєднанні з детальним описом механізмів адаптації на основі штучного інтелекту та ефективних заходів протидії електронному придушенню забезпечує цілісне розуміння вразливостей систем зв'язку, сприяє виявленню критичних точок відмови та створює основу для розробки проактивних стратегій захисту зв'язку, які дозволяють прогнозувати загрози та проектувати адаптивні, стійкі до атак роботизовані комунікаційні рішення.

Ключові слова: автономні роботизовані мережі, протоколи маршрутизації, системи зв'язку UAV та UGV, стійкі радіоканали.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток автономних робото-технічних платформ кардинально змінив сучасні системи зв'язку, які використовуються в розподілених кібер-фізичних середовищах. Серед таких технологій саме безпілотні літальні апарати (UAV – unmanned aerial

vehicles) та безпілотні наземні апарати (UGV – unmanned ground vehicles) стали ключовими елементами мережево-орієнтованих операцій як у цивільній, так і у військовій сферах [1, 2]. Такі платформи здатні виконувати розвідувальні, спостережні, картографічні, логістичні та бойові

завдання, діючи в умовах, що динамічно змінюються і зазвичай є ворожими. Як наслідок, надійний зв'язок між автономними вузлами стає одним із найважливіших технологічних завдань.

Сучасні технологічні тенденції свідчать про перехід від дистанційно керованих дронів, які працюють автономно, до розподілених мереж автономних повітряних і наземних платформ. У таких системах численні UAV і UGV взаємодіють через канали радіозв'язку, спільно виконуючи складні завдання, зокрема масштабне спостереження, розподілене зондування, скоординовані бойові операції, пошуково-рятувальні місії та розгортання тимчасової комунікаційної інфраструктури в умовах стихійних лих або на полі бою. Ці сценарії накладають жорсткі вимоги на комунікаційні мережі щодо підтримки мобільності вузлів, частих змін топології, гетерогенних можливостей зондування та обмежень енергоспоживання.

Традиційні мережі бездротового зв'язку не були розроблені для підтримки таких високодинамічних систем. Класичні протоколи маршрутизації, розроблені для статичних або відносно мобільних мереж, часто не здатні підтримувати стабільне з'єднання в мобільних конфігураціях ad-hoc через швидкий і непередбачуваний рух вузлів. Мережі UAV працюють у тривимірному просторі з принципово іншими моделями мобільності, ніж наземні системи, що призводить до появи та зникнення каналів зв'язку протягом коротких проміжків часу, а отже – до частих збоїв маршрутизації та збільшення втрат пакетів. Ця проблема набула критичного значення в сучасних конфліктах високої інтенсивності, де автономні платформи дедалі частіше використовуються як засоби розвідки, ударні системи та ретранслятори зв'язку, які працюють в умовах радіоелектронної боротьби, радіочастотних перешкод та кібератак.

Інтеграція методів штучного інтелекту та машинного навчання в мережеві протоколи є одним із найперспективніших підходів до вирішення цих проблем. Комунікаційні системи на базі штучного інтелекту дають змогу автономним вузлам навчатися на основі спостережень за навколишнім середовищем, прогнозувати майбутні стани мережі та динамічно адаптувати рішення щодо маршрутизації шляхом аналізу попередніх моделей переміщення, стану каналів та динаміки трафіку – що суттєво підвищує надійність доставки пакетів та зменшує затримку. Архітектури розподіленого зв'язку, в яких функції управління мережею децентралізовані та виконуються локально окремими вузлами, ще більше підви-

щують стійкість системи, усуваючи єдині точки відмови. Це особливо актуально для військових застосувань та гетерогенних багатодомених робототехнічних систем – включаючи UAV, UGV та морські платформи – а також для ройових конфігурацій, для яких потрібні високомасштабовані протоколи, здатні одночасно підтримувати сотні або тисячі взаємопов'язаних вузлів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Впродовж останніх двох десятиліть проблема забезпечення надійного зв'язку в високодинамічних радіомережах привертала значну увагу наукової спільноти. Поява UAV та розподілених робототехнічних систем прискорила дослідження в галузі мобільних мереж (MANET – mobile ad hoc networks) та повітряних мереж (FANET – flying ad hoc networks). За своєю динамічною топологією, обмеженою дальністю зв'язку, високою мобільністю вузлів та жорсткими енергетичними обмеженнями [3, 4] ці мережі суттєво відрізняються від традиційних систем радіозв'язку.

Перші дослідження в галузі мобільних мереж ad-hoc були зосереджені переважно на протоколах маршрутизації, розроблених для наземних мереж. Серед найбільш вивчених підходів – проактивні протоколи маршрутизації, реактивні протоколи маршрутизації та гібридні архітектури маршрутизації [5 – 7]. Проактивні протоколи, такі як Optimized Link State Routing (OLSR), використовують таблиці маршрутизації, в яких постійно зберігаються маршрути до всіх вузлів мережі. Такий підхід забезпечує швидку передачу даних, оскільки маршрути відомі ще до початку зв'язку. Однак проактивна маршрутизація створює додаткові витрати на керування, а це неефективно в мережах із топологією, яка швидко змінюється.

Реактивні протоколи маршрутизації, зокрема Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) та Dynamic Source Routing (DSR), були розроблені з метою зменшення навантаження. У цих протоколах маршрути визначаються лише тоді, коли вузол потребує передачі даних. Хоча такий підхід підвищує ефективність використання пропускну здатності, він збільшує затримку під час процедур визначення маршруту та може призвести до затримок у передачі даних у додатках, де час має вирішальне значення.

Гібридні протоколи маршрутизації намагаються поєднати переваги як проактивного, так і реактивного підходів. Наприклад, протокол Zone Routing Protocol (ZRP) підтримує проактивну інформацію про маршрутизацію в межах локальних зон, використовуючи при цьому реактивні

механізми для зв'язку з віддаленими вузлами. Такі підходи дозволяють досягти компромісу між навантаженням на маршрутизацію та затримкою зв'язку.

Хоча такі протоколи виявилися досить ефективними в класичних мережах MANET, подальші дослідження виявили значні обмеження при їх застосуванні до мереж на базі UAV [8, 9]. Мережі ad-hoc для UAV мають характеристики мобільності, значно відмінні від наземних систем. UAV зазвичай рухаються з більшою швидкістю, діють у тривимірному просторі та часто змінюють відносне положення. Ці фактори призводять до нестабільних каналів зв'язку та частих збоїв маршрутизації.

На основі цього дослідники запропонували кілька протоколів маршрутизації, спеціально розроблених для мереж UAV. Ці протоколи часто використовують географічну інформацію або прогнозування мобільності для підвищення стабільності маршрутів. Підходи на основі географічної маршрутизації використовують фізичне розташування вузлів для прийняття рішень щодо пересилання пакетів. У таких протоколах кожен вузол передає дані сусідам, які географічно знаходяться ближче до пункту призначення. Ця стратегія значно зменшує навантаження на систему маршрутизації, оскільки вузлам не потрібно вести глобальні таблиці маршрутизації.

Інший важливий напрям досліджень пов'язаний з алгоритмами прогнозування маршрутизації, які оцінюють майбутню топологію мережі на основі моделей мобільності. Оскільки траєкторії UAV часто проходять за заздалегідь визначеними маршрутами виконання завдань, прогнозні моделі можуть передбачати положення вузлів і обирати маршрути зв'язку, які залишаються стабільними протягом тривалішого часу. Такий підхід знижує ймовірність перебоїв у маршруті та підвищує надійність доставки пакетів.

Останнім часом інтеграція методів машинного навчання в мережеві протоколи вважається перспективним рішенням для високодинамічних бездротових мереж. Алгоритми машинного навчання дають змогу вузлам зв'язку аналізувати дані про мережу за минулий період, виявляти закономірності в мобільності вузлів та відповідно адаптувати стратегії маршрутизації. Зокрема, значну увагу привертає підкріплювальне навчання, оскільки воно дозволяє вузлам навчатися приймати оптимальні рішення щодо маршрутизації шляхом взаємодії з мережевим середовищем [10, 11].

У протоколах маршрутизації, основаних на підкріплювальному навчанні, кожен вузол діє як інтелектуальний агент, який оцінює якість різних маршрутів на основі таких показників, як коефіцієнт передачі пакетів, затримка передачі та споживання енергії. Згодом агент вдосконалює свою стратегію прийняття рішень, максимізуючи сукупні переваги, пов'язані з успішними результатами зв'язку. Такий адаптивний механізм дозволяє мережі ефективно реагувати на зміни топології та умов трафіку.

Інша група досліджень зосереджена на механізмах маршрутизації, заснованих на глибокому навчанні. Ці підходи використовують нейронні мережі для апроксимації складних функцій прийняття рішень, які визначають оптимальні шляхи зв'язку. Глибокі нейронні мережі здатні обробляти великі обсяги даних і виявляти приховані закономірності, які можуть бути непомітними за допомогою традиційних аналітичних моделей. Відповідно, протоколи маршрутизації на основі глибокого навчання можуть забезпечити кращу ефективність у великих UAV-мережах [12].

Окрім оптимізації маршрутизації, дослідники розглядали можливість використання штучного інтелекту для управління мережевими ресурсами, зменшення перешкод та динамічного розподілу спектра. Такі технології є особливо важливими для систем зв'язку UAV, котрі працюють у перевантажених електромагнітних середовищах. Адаптивне управління спектром дозволяє вузлам зв'язку динамічно обирати частотні діапазони з мінімальними перешкодами, тим самим підвищуючи надійність мережі та пропускну здатність [13].

Ще одним важливим напрямком досліджень є розробка архітектур комунікації роїв. У ройових системах велика кількість UAV спільно виконують складні завдання, такі як розподілене зондування, моніторинг навколишнього середовища та скоординовані пошукові операції. Для забезпечення надійного зв'язку в таких роях потрібні масштабовані мережеві протоколи, здатні одночасно підтримувати сотні вузлів.

Дослідження в галузі комунікації роїв часто присвячені вивченню децентралізованих механізмів координації, в яких окремі UAV приймають локальні рішення на основі обмеженої інформації про стан мережі. Такий децентралізований підхід підвищує стійкість мережі, оскільки зв'язок може продовжуватися навіть у разі виходу з ладу або відключення деяких вузлів. Алгоритми розподіленого ройового інтелекту часто поєднуються

з адаптивними протоколами маршрутизації для забезпечення надійного зв'язку в умовах невизначеності.

Інтенсивна еволюція сучасної війни ще більше активізувала дослідження в галузі стійких систем зв'язку для UAV. Сучасні військові конфлікти засвідчили стратегічне значення безпілотних платформ для розвідки, корекції вогню артилерії, радіоелектронної боротьби та операцій з нанесення точних ударів. Такі платформи мають діяти в умовах, коли канали зв'язку піддаються цілеспрямованому заглушенню, електронному придушенню та кібервтручанню.

Відповідно, сучасні дослідження дедалі більше зосереджуються на технологіях зв'язку, стійких до перешкод, та архітектурах мереж із функцією самовідновлення. Мережі із функцією самовідновлення автоматично переконфігурують маршрути зв'язку у разі втрати вузлів або порушення каналів зв'язку. Алгоритми маршрутизації на основі штучного інтелекту добре підходять для таких умов, оскільки можуть швидко адаптуватися до мінливих умов мережі.

Постановка завдання. Систематизація існуючих обмежень комунікаційних протоколів у розподілених автономних робототехнічних мережах та аналіз технологій маршрутизації на основі штучного інтелекту з метою підвищення стійкості зв'язку є одними з найактуальніших завдань у галузі тактичних систем зв'язку. Основна увага в дослідженні приділяється важливості формалізованої багаторівневої архітектури комунікаційних мереж UAV та UGV – включаючи фізичний канал, мережевий, транспортний, рівень маршрутизації та рівень застосунків – в рамках якої проявляються ключові фактори погіршення якості зв'язку. Актуальність проблеми зумовлена швидким розгортанням автономних робототехнічних платформ у критично вимогливих операційних середовищах – від військових до пошуково-рятувальних – де відмова навіть одного вузла зв'язку може призвести до зриву виконання завдання або втрати ситуаційної обізнаності. Метою цього дослідження є систематизація та класифікація обмежень протоколів маршрутизації у високодинамічних робототехнічних мережах, аналіз адаптивних механізмів маршрутизації на основі штучного інтелекту та обґрунтування ефективних стратегій стійкості зв'язку, спрямованих на зменшенні загальної вразливості мережі в умовах радіоелектронної боротьби та електромагнітних перешкод.

Виклад основного матеріалу дослідження. Автономні робототехнічні платформи, які вико-

ристовуються в сучасних операціях, створюють комунікаційні мережі, які значно відрізняються від традиційних радіосистем. Ці мережі мають низку характерних особливостей:

- мережі UAV та UGV характеризуються високою динамікою переміщення. Повітряні платформи можуть рухатися зі швидкістю, яка перевищує десятки метрів на секунду, одночасно змінюючи висоту та напрямок. Такі схеми руху призводять до постійних змін топології мережі та якості каналів зв'язку. На відміну від звичайних наземних мереж, де положення вузлів залишаються відносно стабільними, повітряні мережі потребують протоколів маршрутизації, здатних адаптуватися до змін топології, які відбуваються за дуже короткі проміжки часу;

- на канали зв'язку між автономними платформами впливають складні умови поширення сигналу. Радіосигнали, які передаються між повітряними апаратами, можуть зазнавати значних флуктуацій через багатопроточне поширення, доплерівські зсуви та перешкоди в навколишньому середовищі. У міських або лісистих умовах затухання сигналу може суттєво зменшити дальність та надійність зв'язку;

- робототехнічні платформи зазвичай працюють в умовах значних енергетичних обмежень. Зокрема, UAV залежать від лімітованих бортових джерел живлення, які повинні забезпечувати роботу як систем руху, так і комунікаційного обладнання. Тому протоколи маршрутизації повинні мінімізувати комунікаційні накладні витрати та уникати непотрібних повторних передач з метою економії енергетичних ресурсів.

Ще однією важливою характеристикою є розподілений характер робототехнічних мереж. У багатьох сценаріях централізована інфраструктура зв'язку недоступна або ненадійна. Натомість автономні платформи повинні утворювати самоорганізовані мережі, здатні підтримувати зв'язок без зовнішнього контролю.

Такі мережі зазвичай називають самоконфігурованими робототехнічними мережами ad-hoc, у яких кожен вузол виконує як функції зондування, так і функції зв'язку. Вузли повинні бути здатні динамічно встановлювати канали зв'язку з сусідніми платформами та співпрацювати для ретрансляції даних до центрів управління місіями або інших підрозділів.

Натомість методи штучного інтелекту надають потужні інструменти для вирішення завдань, пов'язаних із динамічними мережевими середовищами. На відміну від класичних алгоритмів

маршрутизації, які базуються на статичних правилах або детермінованих метриках, протоколи маршрутизації на основі AI можуть адаптувати свою поведінку на основі спостережень у реальному часі та попередніх даних про мережу.

Один із найперспективніших підходів передбачає застосування алгоритмів навчання з підкріпленням. У цій моделі кожен мережевий вузол розглядається як інтелектуальний агент, який взаємодіє зі своїм середовищем і на основі досвіду вивчає оптимальні стратегії маршрутизації.

Процес прийняття рішень щодо маршрутизації можна представити як задачу послідовної оптимізації, в якій агент обирає шляхи зв'язку на основі даних про стан мережі. Ці дані можуть включати такі параметри, як – потужність сигналу між вузлами, затримка передачі пакетів, надійність каналу, моделі мобільності вузлів, доступність енергії.

Постійно оцінюючи результати своїх рішень щодо маршрутизації, агент поступово засвоює правила, яка максимізують довгострокову ефективність зв'язку. Такі механізми, засновані на навчанні, дозволяють мережі адаптуватися до мінливих умов без необхідності використання заздалегідь визначених таблиць маршрутизації або централізованого керування.

Інший перспективний напрямок пов'язаний із використанням глибоких нейронних мереж для прогнозування маршрутизації. Нейронні мережі можуть аналізувати великі обсяги мережевих даних для виявлення складних закономірностей у переміщенні вузлів та стані каналів. Прогнозуючи майбутні стани мережі, ці моделі дозволяють алгоритмам маршрутизації обирати шляхи зв'язку, які, ймовірно, залишатимуться стабільними протягом тривалішого часу.

Ця здатність до прогнозування значно зменшує частоту збоїв маршрутів та покращує загальну ефективність мережі.

Однією з найважливіших вимог до військових робототехнічних систем є здатність підтримувати надійний зв'язок в умовах радіоелектронної боротьби та перевантаження радіочастотного спектра. Ворог може намагатися порушити роботу каналів зв'язку шляхом створення перешкод, втручання або кібератак, спрямованих на мережеву інфраструктуру.

Для протидії цим загрозам сучасні архітектури зв'язку все частіше використовують механізми адаптивного керування радіозв'язком. Ці механізми динамічно коригують параметри передачі, такі як частота, рівень потужності, схема моду-

ляції та маршрут передачі, у відповідь на зміни в електромагнітному середовищі.

Протоколи маршрутизації на основі штучного інтелекту відіграють ключову роль у таких архітектурах, оскільки вони можуть швидко визначати маршрути зв'язку, уникаючи каналів із завадами або погіршеною якістю. Наприклад, якщо певний канал зв'язку стає ненадійним через перешкоди, алгоритм маршрутизації може автоматично перенаправити трафік через альтернативні вузли, розташовані поза межами ураженої зони. Завдяки динамічній адаптації до умов мережі та прогнозуванню майбутніх змін топології інтелектуальні механізми маршрутизації підвищують надійність зв'язку та зменшують операційні ризики.

Крім того, розподілені архітектури зв'язку підвищують живучість системи, усуваючи залежність від централізованих командних вузлів. Якщо певний вузол знищений або відключений, сусідні вузли можуть автономно реорганізувати топологію мережі та підтримувати потоки зв'язку.

Такі механізми самовідновлення мережі є особливо важливими в сучасних умовах бойових дій, де інфраструктура зв'язку може часто пошкоджуватися або порушуватися.

Райові технології є одним із найперспективніших напрямків у розробці автономних систем. У райових архітектурах велика кількість невеликих робототехнічних платформ спільно виконують завдання. Комунікація в таких системах повинна забезпечувати швидкий обмін інформацією між численними вузлами, мінімізуючи при цьому перевантаження мережі.

Протоколи маршрутизації на основі штучного інтелекту дозволяють ройовим мережам підтримувати ефективні комунікаційні структури навіть тоді, коли кількість платформ, залучених до процесу, стає дуже великою. Замість того, щоб використовувати глобальні таблиці маршрутизації, ройові мережі часто застосовують локальні механізми прийняття рішень, за якими кожен вузол взаємодіє переважно з найближчими сусідами.

Такий підхід значно покращує масштабованість, оскільки рішення щодо маршрутизації базуються на локальній інформації, а не на глобальних даних про мережу.

Ройові комунікаційні архітектури можуть також отримати переваги від ієрархічних мережевих структур. У таких системах певні UAV діють як комунікаційні ретранслятори або тимчасові базові станції, утворюючи магістральні мережі, які з'єднують кілька ройових кластерів. Наземні робототехнічні системи можуть отримати доступ

до цих повітряних комунікаційних ретрансляторів для обміну даними з іншими пристроями або командними центрами. Інтеграція комунікаційних рівнів UAV та UGV створює багатодоменну робототехнічну мережу, здатну підтримувати складні спільні місії.

Аналіз існуючих підходів до маршрутизації свідчить, що класичні протоколи, розроблені для традиційних мобільних мереж ad-hoc, є недостатніми для забезпечення зв'язку в мережах, утворених високомобільними платформами. Мережі UAV характеризуються швидкими змінами топології, непередбачуваними умовами зв'язку та значними енергетичними обмеженнями. Ці фактори призводять до частих перебоїв у зв'язку при застосуванні традиційних механізмів маршрутизації.

Крім того, середовище функціонування сучасних робототехнічних систем часто характеризується складними електромагнітними умовами, зумовленими природними перешкодами, перевантаженням спектру та цілеспрямованими діями в рамках радіоелектронної боротьби. За таких обставин протоколи зв'язку повинні мати розширені адаптивні можливості, які дозволяють підтримувати надійну передачу даних попри зовнішні перешкоди.

Аналіз показав, що інтеграція методів штучного інтелекту в механізми маршрутизації мережі є одним із найперспективніших напрямків для вирішення цих завдань. Протоколи маршрутизації на основі AI надають можливість аналізувати умови середовища, навчатися на попередній поведінці мережі та динамічно адаптувати стратегії зв'язку. Такі механізми дозволяють вузлам мережі передбачати потенційні збої зв'язку та проактивно обирати стабільніші маршрути зв'язку.

Однією з важливих переваг інтелектуальних протоколів маршрутизації є їхня здатність працювати в середовищах з розподіленим прийняттям рішень. Замість того, щоб покладатися на централізовані системи керування мережею, кожен вузол у мережі може самостійно оцінювати умови зв'язку та брати участь у загальному процесі маршрутизації. Цей децентралізований підхід значно підвищує живучість мережі, особливо у військових сценаріях, де інфраструктура зв'язку може бути частково знищена або порушена.

Інший ключовий результат стосується важливості архітектур мереж із самовідновленням. Автономні робототехнічні системи, розгорнуті в експлуатаційних середовищах, повинні бути здатні підтримувати зв'язок навіть тоді, коли деякі вузли виходять з ладу або канали зв'язку порушуються.

Інтелектуальні протоколи маршрутизації дають змогу мережам автоматично переконфігурувати свою топологію шляхом динамічного перерозподілу потоків зв'язку через альтернативні вузли.

Механізми маршрутизації на основі штучного інтелекту особливо підходять для мереж роїв, оскільки вони дозволяють приймати рішення на місцевому рівні на основі спостережень за навколишнім середовищем та інформації про стан мережі. Такий підхід дозволяє системам роїв підтримувати ефективність зв'язку навіть при збільшенні кількості учасників [14, 15].

З практичної точки зору, розробка стійких протоколів зв'язку для систем UAV і UGV має значний вплив на сучасні військові операції. Недавні збройні конфлікти показали ефективність безпілотних систем у розвідці, наведенні артилерії та місіях радіоелектронної боротьби. Ці платформи значною мірою покладаються на обмін даними в режимі реального часу між датчиками, операторами та командними підрозділами. Тому стабільність і безпека комунікаційних мереж безпосередньо впливають на оперативну ефективність таких систем.

Використання інтелектуальних протоколів маршрутизації може значно підвищити надійність зв'язку на полі бою, дозволяючи мережам адаптуватися до динамічних оперативних умов. Наприклад, у середовищах, де радіочастоти піддаються перешкодам або глушенню, алгоритми на основі штучного інтелекту можуть автоматично визначати альтернативні маршрути зв'язку або частотні канали, котрі забезпечують більш стабільне з'єднання.

Ще однією важливою практичною перевагою є можливість формування багаторівневих комунікаційних інфраструктур, що складаються з повітряних ретрансляційних платформ, наземних робототехнічних систем та мобільних командних вузлів. У таких архітектурах UAV можуть виступати в ролі тимчасових комунікаційних ретрансляторів, які розширюють покриття наземних мереж. Цей підхід є особливо цінним у складній місцевості, де традиційна комунікаційна інфраструктура недоступна або пошкоджена.

Інтеграція гетерогенних автономних систем – зокрема повітряних, наземних та морських платформ – також потребує розробки уніфікованих протоколів зв'язку, здатних підтримувати міждоменну взаємодію. Підходи до маршрутизації на основі штучного інтелекту забезпечують гнучку основу для досягнення такої інтеграції, оскільки можуть адаптуватися до різних характеристик платформ та вимог до зв'язку.

Незважаючи на прогрес, досягнутий у галузі інтелектуальних протоколів маршрутизації, низка важливих наукових завдань залишається невирішеною. Одне з основних обмежень стосується обчислювальних вимог алгоритмів машинного навчання. Багато сучасних моделей AI потребують значних обчислювальних ресурсів, що може бути складно реалізувати на легких автономних платформах з обмеженими обчислювальними можливостями.

Інша проблема пов'язана з доступністю навчальних даних для алгоритмів машинного навчання. У динамічних операційних середовищах умови мережі можуть швидко змінюватися, що ускладнює використання раніше зібраних наборів даних. Тому майбутні дослідження повинні зосередитися на розробці алгоритмів онлайн-навчання, здатних адаптуватися до нових умов мережі без необхідності тривалого попереднього навчання.

Безпека також залишається критично важливим питанням. Автономні комунікаційні мережі повинні бути захищені від кібератак, перехоплення даних та зловмисних вузлів, які намагаються порушити роботу мережі. Інтеграція механізмів виявлення аномалій на основі AI може забезпечити ефективні інструменти для виявлення та мінімізації таких загроз.

Тому майбутні напрямки досліджень слід зосередити на кількох ключових сферах:

- розробка легких моделей машинного навчання, спеціально призначених для вбудованих робототехнічних платформ, буде важливою для забезпечення адаптивної маршрутизації в режимі реального часу;
- необхідні подальші дослідження в галузі автономного управління спектром, де алгоритми

AI динамічно обирають частоти зв'язку у відповідь на перешкоди та перевантаження спектру;

- розробка стратегій зв'язку проти заглушення на основі моделей прогнозування поведінки мережі ставатиме дедалі важливішою у міру розвитку можливостей радіоелектронної боротьби.

Інший перспективний напрямок пов'язаний зі створенням гібридних архітектур зв'язку, що поєднують мережі UAV із супутниковими системами зв'язку та наземною інфраструктурою зв'язку. Такі гібридні мережі можуть забезпечити глобальну зв'язність, зберігаючи при цьому стійкість до локальних перебоїв.

Висновки. Проведене дослідження вказує на необхідність комплексного підходу до розробки протоколів маршрутизації для розподілених автономних робототехнічних мереж, що дозволяє оцінювати ефективність каналу зв'язку по всьому шляху взаємодії між вузлами UAV і UGV. Формулювання чітко структурованої класифікації обмежень традиційних протоколів маршрутизації у поєднанні з детальним описом адаптивних механізмів маршрутизації на основі штучного інтелекту та ефективних заходів протидії електронному глушінню забезпечує цілісне розуміння вразливостей систем зв'язку, сприяє виявленню критичних точок відмови та створює основу для розробки проактивних стратегій захисту зв'язку в бойових умовах. Такий підхід дозволяє не лише виявляти потенційні вектори погіршення якості зв'язку на різних рівнях мережевої архітектури, а й прогнозувати їх розвиток у контексті динамічної еволюції експлуатаційного середовища, що є особливо важливим для проектування адаптивних та відмовостійких систем зв'язку для розподілених робототехнічних платформ.

Список літератури:

1. Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3), 2013, pp. 1254–1270.
2. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y.H., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2019, pp. 2334–2360.
3. Jawhar I., Mohamed N., Al-Jaroodi J., Agrawal D.P., Zhang S. Communication and networking of UAV-based systems: Classification and associated architectures. *Journal of Network and Computer Applications*, 84, 2017, pp. 93–108.
4. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 2016, pp. 1123–1152.
5. Perkins C.E., Royer E.M. Ad-hoc on-demand distance vector routing. *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 1999, pp. 90–100.
6. Clausen T., Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626, IETF, 2003, pp. 1–75.
7. Haas Z.J., Pearlman M.R., Samar P. The Zone Routing Protocol (ZRP) for ad hoc networks. *IETF Internet Draft*, 2002, pp. 1–27.

8. Sahingoz O.K. Networking models in flying ad-hoc networks (FANETs): Concepts and challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74(1–2), 2014, pp. 513–527.
9. Khuwaja A.A., Chen Y., Zhao N., Alouini M.S., Dobbins P. A survey of channel modeling for UAV communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4), 2018, pp. 2804–2821.
10. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Rusu A., Veness J., Bellemare M. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), 2015, pp. 529–533.
11. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement Learning: An Introduction. MIT Press, Cambridge, 2018, 552 p.
12. Zhu J., Wang X. Model and protocol for energy efficient routing in heterogeneous multi-hop wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 12(7), 2013, pp. 1294–1307.
13. Shi W., Zhou H., Li J., Xu W., Zhang N., Shen X. Drone assisted vehicular networks: Architecture, challenges and opportunities. *IEEE Network*, 32(3), 2018, pp. 130–137.
14. Akyildiz I.F., Wang X., Wang W. Wireless mesh networks: A survey. *Computer Networks*, 47(4), 2005, pp. 445–487.
15. Sharma V., Kumar R. Cooperative frameworks and network models for flying ad hoc networks: A survey. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 29(4), 2017, e3931.

Movchan K.O. CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ADAPTIVE COMMUNICATION PROTOCOLS FOR TACTICAL UAV AND UGV NETWORKS

This article examines the challenges of ensuring reliable communication in heterogeneous systems of distributed autonomous robotic networks, which are characterized by exponential growth in the number of nodes and their integration into critical military and civilian infrastructure. The focus is on the high mobility of UAV and UGV nodes, the dynamic nature of network topology changes, and the limited spectral and energy resources of autonomous platforms, which renders traditional routing protocols inadequate and creates significant risks to communication stability in areas such as reconnaissance, fire control, electronic warfare, and precision strike operations.

Current trends in the development of communication threats are analyzed, in particular targeted radio frequency jamming, electronic suppression, and cyberattacks on network infrastructure, which often remain undetected due to the lack of integrated adaptive monitoring systems. Particular attention is paid to the vulnerabilities of centralized communication architectures, where the destruction of individual nodes leads to cascading network failures, as well as the fragmentation of robotic ecosystems, which complicates the deployment of unified communication management systems.

Key vectors for the degradation of communication quality at various levels of the distributed robotic network architecture have been identified, covering the physical channel, routing protocol, and application interaction levels. The article examines hardware vulnerabilities at the radio interface level, network-level attacks, including jamming, as well as software weaknesses in routing decision-making mechanisms under conditions of incomplete topological information.

Multi-level approaches to adaptive routing are proposed, which include AI-based mechanisms—reinforcement learning algorithms and deep neural networks for predictive routing—alongside self-healing network architectures, distributed spectrum management, and anti-jamming communication strategies. The necessity of adaptive approaches in the context of specific robotics deployments is emphasized, including swarm systems, multi-domain heterogeneous platforms, and UAV-based relay infrastructures. It is concluded that a comprehensive approach to designing communication protocols for distributed robotic networks, which takes into account network multilayering, platform-specific operational requirements, and computational resource constraints, is of critical importance. Formulating a clearly structured classification of routing constraints, combined with a detailed description of AI-based adaptation mechanisms and effective countermeasures against electronic jamming, provides a comprehensive understanding of communication system vulnerabilities, facilitates the identification of critical points of failure, and creates a foundation for developing proactive communication protection strategies that enable the prediction of threats and the design of adaptive, attack-resistant robotic communication solutions.

Keywords: autonomous robotic networks, routing protocols, UAV and UGV communication systems, resilient radio channels.

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 004.94:621.39

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/14>

Морщавка С.В.

<https://orcid.org/0000-0002-6793-8728>

Національний університет «Запорізька політехніка»

Бугрова Т.І.

<https://orcid.org/0000-0003-1701-9771>

Національний університет «Запорізька політехніка»

Чорнобородов М.П.

<https://orcid.org/0000-0003-1230-9374>

Національний університет «Запорізька політехніка»

Логачова Л.М.

<https://orcid.org/0000-0003-2366-9754>

Національний університет «Запорізька політехніка»

Самойлик С.С.

<https://orcid.org/0000-0003-1308-4744>

Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКРИТТЯ РАДІОМЕРЕЖ З ЗАСТОСУВАННЯМ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ТА ДЕКОМПОЗИЦІЙНОГО ПІДХОДУ НА БАЗІ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

У статті запропоновано гнучкий та обчислювально ефективний метод прогнозування карт покриття радіосигналами приміщень та ділянок на основі двовимірного плану, що поєднує локальне нейромережеве моделювання з ітеративним механізмом поширення сигналу, організованим за принципом клітинного автомата.

У цьому підході використано просторову декомпозицію планів приміщень, для фрагментів яких незалежно навчаються дві нейронні мережі: одна для розподілу сигналу у внутрішній зоні фрагмента; інша для визначення значення сигналу на двох невідомих бічних межах за двома відомими протилежними. Додатково для визначення сигналів протилежної межі застосовано метод конусного оцінювання на основі спрощеної апроксимації принципу Гюйгенса, у якому результативне значення є зваженою сумою вкладень точок джерел вхідної межі з урахуванням кутового відхилення та загасання сигналу на шляху через конструктивні елементи. Цей підхід дозволяє отримувати плавний градієнт тіні за частковими перешкодами та усуває артефакти прямолінійного трасування. Завдяки ж декомпозиції навчання виконується на значно більшій кількості зразків при обмеженій кількості повних планів, що суттєво знижує вимоги до навчальних даних.

Розширення зони розрахунку за планом, організовано у вигляді хвильового фронту від фрагмента з передавачем, коли кожен опрацьований фрагмент передає граничні умови своїм сусідам, які стоять наступними елементами черги. За рахунок багатопрохідної релаксації при додаткових проходах, між якими використовують згладжування сигнального поля з частковим оновленням граничних значень, забезпечується поступове вирівнювання неоднорідностей на межах фрагментів.

Порівняння з еталонними картами, отриманими засобами детерміністичного променевого трасування, підтверджує коректну передачу ефектів загасання та утворення радіотіні при проходженні сигналу через конструктивні будівельні елементи.

Ключові слова: радіомережа, глибоке навчання, клітинний автомат, глибока нейронна мережа, ітеративна декомпозиція, сигнальна карта.

Постановка проблеми. Прогнозування рівня сигналу та побудова карт покриття бездротових мереж є одними з ключових завдань при проектуванні та оптимізації сучасних систем зв'язку – Wi-Fi, LTE та мереж п'ятого покоління. Традиційні емпіричні моделі (Okumura-Hata, COST-231) забезпечують прийнятну точність лише у відносно однорідних середовищах, детерміністичне трасування променів вимагає повної тривимірної моделі середовища та значних обчислювальних ресурсів, методи глибокого навчання здатні апроксимувати складні залежності, але більшість наявних підходів навчаються та застосовуються до повних планів приміщень, що потребує великих навчальних вибірок і не забезпечує масштабованості до довільних розмірів об'єктів. Тож розробка підходу до прогнозування покриття радіомереж, який поєднує методи глибокого навчання, що використовуються локально, з декомпозиційною моделлю, дозволить врахувати просторову структуру середовища та взаємодію між її елементами та набути властивості масштабування одночасно з універсальністю та точністю сучасних методів глибокого навчання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З розвитком методів машинного навчання з'явилася можливість застосування глибоких нейронних мереж для прогнозування радіопокриття [1]. Одним із найбільш відомих підходів є модель RadioUNet, запропонована у роботі [2]. У цій моделі використовується згортоква нейронна мережа типу U-Net для оцінювання втрат сигналу між передавачем та будь-якою точкою на площині. Автори показали, що така модель здатна навчатися на даних фізичного моделювання і забезпечує результати, близькі до точних електромагнітних розрахунків, але з набагато меншою обчислювальною складністю.

Метод RadioUNet став основою для подальших досліджень у галузі прогнозування карт покриття. У роботах [3–5] було показано, що глибокі нейронні мережі можуть ефективно враховувати складну структуру міського середовища, включаючи будівлі, вулиці та інші перешкоди. Це дозволяє значно підвищити точність прогнозування рівня сигналу порівняно з традиційними статистичними моделями.

Інший напрям досліджень пов'язаний із використанням глибокого навчання для оцінювання параметрів радіосигналу, таких як рівень прийнятого сигналу (RSSI), втрати на поширення та просторовий розподіл потужності сигналу. У роботах [6,7] запропоновано моделі на основі повнозгорткових нейронних мереж (FCNN) для

прогнозування карт рівня сигналу у приміщеннях та міських середовищах. Такі моделі дозволяють будувати двовимірні карти потужності сигналу з високою просторовою роздільною здатністю.

У роботі [8] запропоновано модель на основі генеративних змагальних мереж (GAN) для інтерполяції вимірювань сигналу та побудови радіокарт на основі обмеженої кількості вимірювань. Запропонований підхід дозволяє формувати гладкі та точні радіокarti навіть при нерівномірному розташуванні сенсорів.

Іншим перспективним напрямком є гібридні підходи [9], що поєднують фізичні моделі поширення радіохвиль і методи машинного навчання. У таких підходах дані, отримані за допомогою симуляцій на основі моделей трасування променів, використовуються для попереднього навчання нейронної мережі, після чого модель адаптується до реального середовища за допомогою обмеженої кількості вимірювань. Такий підхід дозволяє зменшити обсяг необхідних експериментальних даних та підвищити узагальнювальну здатність моделі.

Важливим етапом розвитку цієї галузі став міжнародний конкурс Pathloss Radio Map Prediction Challenge, результати якого узагальнено у роботі [10]. У цьому дослідженні було проведено порівняльний аналіз сучасних методів прогнозування карт радіопокриття, включаючи моделі на основі CNN, GAN та трансформерів. Результати показали, що методи глибокого навчання здатні забезпечити високу точність прогнозування при значно меншій обчислювальній складності порівняно з методами трасування променів.

Аналіз сучасних досліджень показує, що використання глибокого навчання значно підвищує точність прогнозування покриття радіомереж. Нейронні мережі здатні враховувати складні просторові залежності між параметрами середовища та характеристиками сигналу, що дозволяє отримувати більш точні результати порівняно з традиційними моделями. Разом з тим такі підходи мають ряд обмежень. По-перше, вони потребують значних обсягів навчальних даних. По-друге, моделі глибокого навчання можуть бути чутливими до змін середовища, що потребує додаткових механізмів адаптації.

У зв'язку з цим перспективним напрямом досліджень є поєднання методів глибокого навчання з математичними моделями просторових процесів, зокрема з методами на основі клітинних автоматів. Такий підхід дозволяє поєднати високу точність нейронних мереж із ефективним моделюванням просторової структури радіомереж.

Постановка завдання. Беручи до уваги обмеження класичних підходів до прогнозування радіопокриття, а також недоліки сучасних нейромережових моделей, що потребують значних обчислювальних ресурсів та великого обсягу навчальних даних, у даній роботі пропонується альтернативний підхід до локального моделювання радіополя. Його основна ідея полягає в уявленні плану у вигляді двовимірної дискретної сітки

$$P = \{p_{i,j}\}, \quad i=1, N, \quad j=1, M,$$

де кожна комірка $p_{i,j}$ відповідає локальній області певного розміру.

Кожна комірка характеризується набором ознак

$$x_{i,j} = (m_{i,j}, a_{i,j}, d_{i,j}, w_{i,j}, \dots),$$

де $m_{i,j}$ – тип матеріалу (бетон, цегла, дерево, скло тощо);

$a_{i,j}$ – наявність точки доступу;

$d_{i,j}$ – відстань до передавача;

$w_{i,j}$ – наявність дверей або вікон.

Задача полягає у знаходженні функції

$$f_{\theta}(X) \rightarrow R,$$

де X – локальний фрагмент плану розміром $k \times k$ комірок,

R – прогнозований рівень сигналу (RSSI).

Вказана функція є предметом задачі оптимізації на базі функції втрат, наприклад такої:

$$L = \frac{1}{N} \sum (RSSI_{pred} - RSSI_{true})^2$$

Після отримання прогнозів для всіх локальних областей формується глобальна карта покриття

$$C = \{r_{i,j}\},$$

яка відображає просторовий розподіл рівня сигналу у приміщенні.

При цьому ключовим завданням є розробка алгоритму декомпозиції глобальної карти на локальні області, який дозволить локально розрахувати рівень сигналу в кожній з них, використовуючи тільки сигнали на межах суміжних фрагментів, та здійснити подальше зшивання прогнозованих результатів всіх фрагментів. Критерієм правильності є відтворення розподілу сигналів у межах всього плану. Вирішити це завдання пропонується через поступове поширення передбачення сигналу від джерела випромінювання у навколишній простір з використанням локальної нейромережової моделі, що враховує параметри середовища та значення сигналу на межах раніше обчислених областей.

Метою статті є верифікація можливостей реалізації гнучкого та ефективного з обчислювальної точки зору методу прогнозування карт покриття радіосигналами приміщень та ділянок на основі двовимірного плану. Підхід має поєднати локальне нейромережове моделювання з ітеративним механізмом поширення сигналу, яке організується за принципом клітинного автомату

Виклад основного матеріалу. На відміну від традиційних підходів, де простір одразу дискретизується на регулярну піксельну сітку з подальшим незалежним розрахунком кожної точки або комірки, у запропонованому підході декомпозиція простору на фрагменти виконується динамічно по мірі поширення хвилі передбачень сигналів. Ці сигнали розраховуються локально та ітеративно для отримання усталених значень.

Початковим елементом розрахунку є квадратна область, у центрі якої розташовано передавач або точку доступу. Для цієї області формується початкове передбачення рівня сигналу на основі параметрів передавача (потужність, частота, тип антени) та локальної інформації про геометрію середовища (стіни, матеріали, перешкоди, якщо вони там є). Цей початковий стан є базою для подальшого поширення моделі.

На наступному етапі розрахунок розширюється на чотири сусідні комірки – вгору, вниз, ліворуч та праворуч від початкової комірки. Для кожної з них передбачення виконується нейромережовою моделлю, яка використовує в якості вхідних параметрів не лише локальні характеристики середовища, але й значення сигналу на спільній межі із вже обчисленою коміркою. Таким чином, інформація про рівень сигналу поступово передається між сусідніми комірками, що дозволяє моделювати природний процес затухання та дифракції електромагнітної хвилі в середовищі її поширення.

Подальший розвиток розрахунку відбувається ітеративно: кожна нова область, для якої отримано прогноз, породжує розрахунок для своїх сусідніх областей, які не були обчислені раніше (рис. 1). Фактично формується хвилеподібний фронт обчислення, що поступово розширюється від джерела сигналу до віддалених частин приміщення. При цьому значення сигналу на межах між комірками використовуються в якості граничних умов для нових локальних прогнозів.

Такий механізм нагадує принцип функціонування клітинних автоматів, зокрема класичної гри «Життя» (Game of Life) [11], де стан кожної клітини визначається станами сусідніх клітин.

У даному випадку станом клітини є прогнозований рівень сигналу, а еволюція системи визначається нейромережевою моделлю, що виконує роль локального оператора переходу. На відміну від випадкової або наперед заданої регулярної дискретизації простору, обчислювальна сітка формується поступово, у міру необхідності, що дозволяє концентрувати обчислювальні ресурси в тих областях, де відбуваються суттєві зміни сигналу.

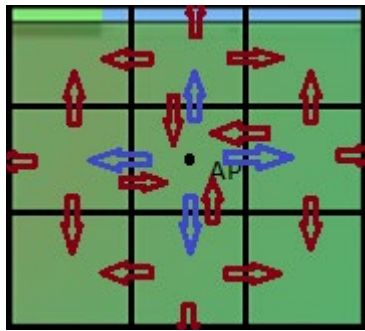


Рис. 1. Напрямки поширення розрахунків на 1-му та 2-му кроці (сині та червоні стрілки, відповідно)

Ітераційний процес релаксації триває доти, доки не буде досягнуто або усталеного розподілу сигналу, або повторення заданої кількості разів. Для прикладу, наведеному на рис. 1, це означатиме, що на третьому кроці повторювати поширення з комірки з точкою доступу до сусідніх комірок не потрібно, якщо тільки перешкода з якогось боку не буде створювати відбиття, яке впливає на розподіл в цій комірці. Після цього сформована карта покриття вважається стабілізованою та може використовуватися для подальшого аналізу, оптимізації розміщення точок доступу або для оцінки якості зв'язку. Для безпосередніх передбачень у кожному локальному фрагменті може бути використана архітектура згорткової нейронної мережі.

Для перевірки запропонованого підходу був розроблений програмний модуль, що реалізує повний цикл: підготовку навчальних даних, навчання нейромережевої моделі та ітеративне поширення сигналу від джерела по всьому плану приміщення. В процесі розробки підхід суттєво вдосконалювався у двох напрямках: поліпшення точності оцінки граничних умов між суміжними ділянками та забезпечення повноцінної релаксації при повторних проходах обчислень.

Навчальні дані формувались на основі набору растрових зображень планів приміщень у форматі BMP, для кожного з яких заздалегідь було розраховано еталонний розподіл рівня сигналу засобами детермінованого трасувального моделювання. Рівень сигналу декодувався за формулою

$(G - R + 255) / 510$, що дозволяє представити його у нормалізованому діапазоні $[0, 1]$ на основі співвідношення зеленого (G) та червоного (R) каналів зображення.

Для кожного плану формувалась маска структурних елементів середовища. Кожному типу конструктивного елемента присвоювалось числове значення у діапазоні від 0 до 1, яке відображає відносний ступінь загасання сигналу. Наприклад, для легких стін обирався коефіцієнт 0,1, натомість, для бетонних стін – рівень коефіцієнта був 0,5 а для металевих елементів він дорівнював 0,8.

Отримані сигнальні карти та маски динамічно нарізались на перекривні фрагменти розміром $n \times 12 \times n \times 12$ пікселів із кроком $n \times 11$ пікселів (рис. 2). Тут n відіграє функцію масштабування – пристосування до реального піксельного масштабу плану без необхідності перенавчання моделей. Такий крок забезпечує точне суміщення граничних рамок сусідніх фрагментів: гранична рамка правого фрагмента шириною n пікселів збігається рівно з граничною рамкою лівого без подвійного перекриття внутрішньої зони. Фрагменти, у яких центральна зона $n \times 10 \times n \times 10$ не містила жодного ненульового значення сигналу, виключались із навчальної вибірки.

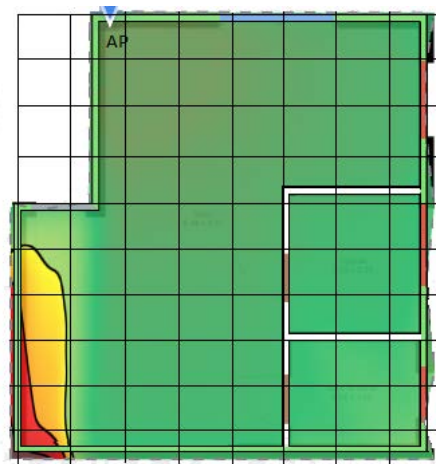


Рис. 2. Приклад декомпозиції плану, що використовується для навчання

В кінцевій реалізації використовуються дві спеціалізовані нейромережеві моделі, кожна з яких вирішує окрему задачу. Перша – відповідає за заповнення внутрішньої зони. Вона призначається для передбачення розподілу сигналу всередині фрагмента за умови, що всі чотири граничні межі вже відомі. Для неї кожен навчальний взірєць містить граничні рамки, заповнені еталонними значеннями, а внутрішня зона є зоною прогнозу. Ця модель є основою системи, оскільки описані нижче меха-

нізми визначення граничних умов зрештою зводять будь-який випадок до задачі з чотирма відомими межами. Друга модель відповідає за заповнення бічних меж. Вона призначається для відновлення двох невідомих протилежних меж фрагмента, коли відомі лише дві інші протилежні межі. Вхідний сигнальний канал для неї містить значення лише на відомій парі меж, а функція втрат зосереджена на точності відновлених сторін. Навчання цієї моделі виконується з двома орієнтаціями (горизонтальною та вертикальною) шляхом повороту фрагментів на 90 градусів.

Обидві моделі побудовані за архітектурою згорнутої мережі типу U-Net для фрагментів 36×36 пікселів. (Тут і надалі будемо вважати, що n дорівнює 3. Це значення є достатнім для використаних планів розмірами до 1000 пікселів). Кодувальна частина містить два блоки згорткових шарів з проміжним зменшенням просторового розміру ($36 \times 36 \rightarrow 18 \times 18 \rightarrow 9 \times 9$), що дозволяє охопити рецептивним полем увесь фрагмент. Розшифрувальна частина відновлює розмір через транспоновані згортки з передачею відповідних ознак від кодувальника. Вихідний шар формує передбачений розподіл сигналу. Навчання проводилось оптимізатором Адама з початковою швидкістю навчання 0,001 та планувальником, що поступово знижує швидкість навчання за косинусним законом протягом 80 епох.

Початкові спроби заповнення відсутніх граничних умов шляхом прямолінійного перенесення сигналу вздовж одного променя від відомої межі виявили суттєві артефакти у вигляді чітких прямолінійних тіней за перешкодами та рівномірних «променів» у чотири сторони від передавача. Причина цього полягає в тому, що поширення радіосигналу є явищем хвильовим: сигнал огинає краї перешкод, тінь від асиметрично розташованого конструктивного елемента плавно розмивається в просторі, а не обривається різко.

Для усунення цього недоліку запроваджено конусне оцінювання граничних умов, що апроксимує принцип Гюйгенса: кожна точка відомої межі розглядається як окреме точкове джерело сигналу, що поширюється у широкому конусі. Результуюче значення $\hat{s}(d)$ на відсутній межі є зваженою сумою вкладів від усіх Q точок-джерел активної межі:

$$\hat{s}(d) = \frac{\sum_{q=1}^Q w_q a_q s(q)}{\sum_{q=1}^Q w_q}$$

де $s(q)$ – значення сигналу у точці-джерела q , w_q – кутова вага, a_q – загасання вздовж відповідного променя.

Вага кожного джерела визначається двома факторами. Перший – кутове відхилення від основного напрямку поширення, яке враховується за законом Гауса:

$$w_q = e^{-\frac{l_q^2}{2\sigma^2}}, \quad l_q = \frac{|l_q - l_d|}{r_{qd}},$$

де l_q – нормована бічна відстань між джерелом q та цільовою точкою d , r_{qd} – пряма відстань між ними, σ – параметр ширини конуса.

Завдяки такому зважуванню джерела, які розташовано поблизу основного напрямку поширення, створюють домінуючий внесок, тоді як бічні джерела впливають на результат значно менше.

Другий фактор – загасання a_q вздовж дискретного шляху від точки q до точки d . Загасання розраховується як добуток коефіцієнтів прозорості по кожному пікселю шляху:

$$a_q = \prod_{i=1}^L (1 - m_i),$$

де $m_i \in [0,1]$ – значення маски структурного елемента у i -му пікселі шляху ($m_i = 0$ для вільного простору, $m_i \approx 1$ для суцільної перешкоди), L – довжина шляху в пікселях.

При наявності перешкоди у вигляді суцільної стіни добуток прагне до нуля, що повністю блокує внесок відповідного джерела. Це природним чином формує радіотінь за перешкодою. Для часткових перешкод (вікна, легкі перегородки) добуток залишається ненульовим, що дозволяє отримувати плавний градієнт тіні замість різкого обриву, характерного для прямолінійного трасування.

Така апроксимація дає плавний градієнт тіні в зонах за частковими перешкодами: частина конусу проходить повз перешкоду і створює ненульовий внесок, тоді як промені, що перетинають перешкоду, загасають.

Повний алгоритм встановлення граничних умов перед застосуванням моделі заповнення внутрішньої зони залежить від кількості вже відомих меж фрагмента. Якщо відомі всі чотири межі, модель заповнення внутрішньої зони застосовується безпосередньо. Якщо відомі дві суміжні межі, конусне оцінювання відновлює дві відсутні, після чого застосовується модель заповнення внутрішньої зони. Якщо відома лише одна межа, конусне оцінювання встановлює протилежну межу, після чого модель заповнення бічних меж відновлює дві суміжні, і лише тоді виконується заповнення внутрішньої зони.

Перед початком розрахунку вхідний план розширюється доповненням (відступами) таким чином, щоб будь-яка його точка потрапляла при-

наймні в один фрагмент, а загальний розмір був кратний кроку 33 пікселі. Граничні рамки фрагмента з точкою доступу ініціалізуються значенням 0,75 (що відповідає зеленому кольору на плані) і фіксуються як незмінні.

Розрахунок виконується методом хвильового поширення: від фрагмента з передавачем назовні у чотири сторони (як на рис.1), з поступовим охопленням усього плану. Для кожного нового фрагмента формуються граничні умови описаним вище методом, після чого модель заповнення внутрішньої зони передбачає розподіл сигналу в центральній частині. Вихідні межі фрагмента фіксуються і слугують граничними умовами для сусідніх фрагментів наступного кроку поширення.

Перший прохід хвильового поширення формує початкове глобальне поле покриття. Однак через те, що кожен фрагмент у цьому проході отримує лише обмежену інформацію про сусідів (найчастіше з одного або двох боків), результат містить помітні неоднорідності на межах між фрагментами. Для їх усунення реалізовано багатопрохідну релаксацію за принципом клітинного автомата: після першого проходу виконуються додаткові повні проходи хвилі по всіх фрагментах плану. У кожному наступному проході кожен фрагмент вже має чотири відомі межі (від попереднього проходу), тож застосовується виключно модель заповнення внутрішньої зони з оновленими граничними умовами від сусідів. Кількість додаткових проходів задається параметром глибини релаксації.

Щоб релаксаційні проходи давали реальне уточнення, а не просто відтворювали попередній результат, між кожними двома проходами виконується медіанне згладжування глобального поля покриття. Медіанний фільтр із вікном розміром у один фрагмент (36 пікселів) застосовується до всіх пікселів, де присутній сигнал і відсутні структурні елементи. Значення на зафіксованих пікселях (точка доступу) та у зонах структурних елементів залишаються незмінними. Для решти пікселів (включно з граничними рамками фрагментів) застосовується м'яке змішування: результуюче значення обчислюється як зважена сума $(1 - \alpha)$ від попереднього та α від згладженого. Завдяки цьому граничні умови між проходами поступово вирівнюються, і кожен наступний прохід отримує дещо інші вхідні дані, що й забезпечує справжню релаксацію системи.

Запропонований алгоритм дозволяє отримувати карти покриття для планів довільного розміру без перенавчання моделі. Вся адаптація до розміру приміщення відбувається на рівні меха-

нізму хвильового поширення, в той час, як нейромережеві моделі завжди оперують фрагментами фіксованого розміру 36×36 пікселів для масштабу $n=3$. Зміна масштабного коефіцієнта можлива без перенавчання моделей.

Приклад отриманих результатів наведено на рис.3, де показано початкові дані у вигляді прямокутної кімнати з металевою перегородкою посередині та розташуванням передавача над нею (на плані), а також отриманий результат моделювання запропонованим методом у порівнянні з результатом моделювання за допомогою трасування променів у сторонньому програмному продукті.

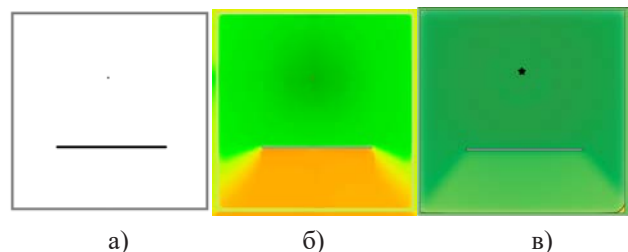


Рис. 3. Приклад тестового плану (а) та результатів його прогнозування (б) запропонованим методом та розраховані методом променевого трасування (в)

Результати демонструють узгодженість областей радіотіні, але є дещо відмінними у кількісних оцінках послаблення сигналу, що вимагає подальшої калібрації коефіцієнтів поглинання різних елементів в ході глобальної параметричної оптимізації параметрів.

Висновки. Запропонований підхід має кілька важливих властивостей, які дозволяють покращити процес створення карт покриття радіосигналів, зокрема, полегшити масштабування та підвищити ефективність прогнозування рівня сигналу. Масштабованість досягається тим, що робить моделі глибокого навчання, передусім згорткові нейромережі, придатними для прогнозування у приміщеннях довільного розміру, завдяки використанню локальних фрагментів плану, з яких складається повна картина. Ефективність навчання та використання моделей підвищується внаслідок того, що замість великих планів використовується велика кількість невеликих навчальних вибірок. Це підвищує сумісність із сучасними DL методами (CNN-архітектури) без надмірного ускладнення моделей завдяки використанню методології клітинних автоматів для організації поширення радіосигналів. При цьому локальний характер обчислень дозволяє легко масштабувати алгоритм та реалізувати його на обчислювальних пристроях з обмеженими ресурсами, включаючи вбудовані системи.

Додатковою перевагою запропонованого підходу є можливість адаптивного уточнення карти покриття. Наприклад, у тих областях, де спостерігаються значні градієнти сигналу (поблизу перешкод або меж приміщень), розмір локальних комірок може бути зменшений, що збільшує просторову точність моделі. Натомість, у зонах з плавною зміною сигналу, допускається використання більших за розміром областей, що зменшує загальну кількість обчислень.

Таким чином, запропонований підхід поєднує переваги фізично обґрунтованого моделю-

вання та сучасних методів машинного навчання. Локальна нейромережева модель виступає аналогом оператора поширення електромагнітного поля, тоді як ітераційна схема розповсюдження обчислень забезпечує формування глобальної карти покриття. Така архітектура потенційно дозволяє створювати системи швидкого прогнозування радіопокриття для мереж Wi-Fi, Bluetooth та інших бездротових технологій зв'язку без необхідності виконання складних електродинамічних розрахунків у повному обсязі.

Список літератури:

1. O'Shea T., Hoydis J. An Introduction to Deep Learning for the Physical Layer, in *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2017. Vol. 3, no. 4, pp. 563-575, Dec. 2017. doi: 10.1109/TCCN.2017.2758370
2. Levie R., Yapar C., Kutyniok G., Caire G. RadioUNet: Fast Radio Map Estimation With Convolutional Neural Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021. Vol. 20, № 9. P. 5698–5711. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.07158>
3. Tian Y., Yuan S., Chen W., Liu N. RadioNet: Transformer Based Radio Map Prediction Model for Dense Urban Environments. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 79557–79569. doi: 10.1109/ISAPES4070.2021.9753644
4. Yapar C., Levie R., Kutyniok G., Caire G. LocUNet: Fast Urban Positioning Using Radio Maps and Deep Learning. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2022. P. 1–6. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.00738>
5. Sallouha H., Sarkar S., Krijestorac E., Cabric D. Agile Radio Map Prediction Using Deep Learning. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2023. P. 1–5. doi: 10.1109/ICASSP49357.2023.10096546
6. Mismar F. B., Evans B. L., Alkhateeb A. Deep Reinforcement Learning for 5G Networks: Joint Beamforming, Power Control, and Interference Coordination, in *IEEE Transactions on Communications*, 2020. Vol. 68, no. 3, pp. 1581-1592, March 2020, doi: 10.1109/TCOMM.2019.2961332.
7. Pyo C., Sawada H., Matsumura T. A Deep Learning-Based Indoor Radio Estimation Method Driven by 2.4 GHz Ray-Tracing Data in *IEEE Access*, 2023. Vol. 11, pp. 138215-138228, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3340204
8. Sarkar, Sopan & Manshaei, Mohammad Hossein & Krunz, Marwan. RADIANCE: Radio-Frequency Adversarial Deep-learning Inference for Automated Network Coverage Estimation. 2023, doi: 10.48550/arXiv.2308.10584.
9. Thrane J., Zibar D., Christiansen H. L. Model-Aided Deep Learning Method for Path Loss Prediction in Mobile Communication Systems at 2.6 GHz, in *IEEE Access*, 2020. Vol. 8, pp. 7925-7936. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964103.
10. Yapar C., Jaensch F., Levie R., Kutyniok G., Caire G. Overview of the First Pathloss Radio Map Prediction Challenge, in *IEEE Open Journal of Signal Processing*, 2024, vol. 5, pp. 948-963, 2024, doi: 10.1109/OJSP.2024.3419563.
11. Gardner, M. (1970). Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game «life». *Scientific American*, 1970. № 223, 120-123

Morshchavka S.V., Bugrova T.I., Chornoborodov M.P., Logacheva L.M., Samoylyk S.S. RADIO NETWORK COVERAGE PREDICTION METHODS USING DEEP LEARNING AND DECOMPOSITION APPROACH BASED ON CELLULAR AUTOMATA

The paper proposes an adaptive and computationally efficient method for predicting indoor and outdoor radio signal coverage maps from two-dimensional floor plans. The method combines local neural network modelling with an iterative signal propagation mechanism organized on the principle of a cellular automaton.

The method employs spatial decomposition of floor plans, for whose fragments two neural networks are trained independently: one for reconstructing the signal distribution within the interior zone of a fragment, and another for determining signal values on two unknown lateral boundaries given to two known opposite ones. Additionally, a cone estimation method based on a simplified approximation of the Huygens principle is used to determine signals on the opposite boundary, in which the resulting value is a weighted sum of contributions from source points on the input boundary, accounting for angular deviation and signal attenuation along the path through structural elements. This approach yields a smooth shadow gradient behind partial obstacles and eliminates ray-tracing artefacts. Furthermore, decomposition-based training is performed on a substantially larger number of samples with a limited number of complete floor plans, significantly reducing the requirements for training data.

Propagation of the computation across the floor plan is organized as a wavefront from the transmitter fragment, with each processed fragment passing boundary conditions to its neighbors, which become the next elements in the queue. Multi-pass relaxation over additional passes, between which smoothing of the signal field with partial updating of boundary values is applied, ensures gradual elimination of inhomogeneities at fragment boundaries.

Comparison with reference maps obtained by deterministic ray tracing confirms accurate reproduction of attenuation effects and radio shadow formation as the signal passes through structural building elements.

Keywords: radio network, deep learning, cellular automaton, deep neural network, iterative decomposition, signal map, loss function.

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 621.396.96:629.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/15>**Середа С.С.**<https://orcid.org/0009-0008-0460-1678>

Харківський національний університет радіоелектроніки

Кравченко П.О.<https://orcid.org/0000-0002-0456-3295>

Харківський національний університет радіоелектроніки

МЕТОДИ БЕЗДРОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ МІЖ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ РОЮ

У цій статті досліджуються сучасні методи та технології бездрової передачі даних між безпілотними літальними апаратами (БПЛА) у складі рою, що є критичним питанням для забезпечення ефективної координації та взаємодії дронів під час виконання різноманітних задач. Розглядаються основні концепції побудови літаючих спеціалізованих мереж (Flying Ad-Hoc Networks, FANET), які характеризуються високою мобільністю вузлів у просторі, низькою щільністю мережі та швидкою зміною топології, що відрізняє їх від традиційних мереж MANET та транспортних мереж VANET.

Детально аналізуються технології короткого діапазону, такі як Wi-Fi на базі стандарту IEEE 802.11 з mesh-топологією для швидкої передачі відео та ZigBee (IEEE 802.15.4) для ефективного енергоспоживання під час передачі телеметрії з дальністю до 100 метрів. Розглядається використання систем оптичного позиціонування для забезпечення безпеки у щільних формаціях та можливість інтеграції мереж 4G LTE та 5G з пропусковою здатністю до 10 Гбіт/с та затримкою менше 1 мс для підтримки machine-to-machine комунікацій. Особлива увага приділяється протоколам маршрутизації FANET, включаючи реактивні протоколи AODV та DSR, що встановлюють маршрути лише на вимогу (on-demand), проактивний протокол OLSR з концепцією багатоточкових ретрансляторів, та гібридний підхід типу Reactive-Greedy-Reactive. Досліджуються архітектури мереж БПЛА-роїв, а саме: централізовані з використанням базових станцій, децентралізовані з прямими каналами UAV-to-UAV та ієрархічні мережі з підтримкою кластеризації вузлів. Розглядаються питання енергоефективності для збільшення часу польоту.

Проаналізовано перспективи використання супутникових та стільникових мереж для використання БПЛА на крайній великих відстанях. Результати дослідження показують, що вибір найоптимальнішого методу передачі даних залежить від різноманітних вимог виконуваної задачі, які можуть включати в себе дальність зв'язку, швидкість передачі даних, енергоефективність тощо. Гібридні підходи та біоінспіровані алгоритми краще адаптуються до змін топології у високодинамічних мережах. Вони забезпечують найкращу надійність та гнучкість для складних задач, які стоять перед БПЛА роєм.

Ключові слова: БПЛА-рій, бездротова передача даних, FANET, Wi-Fi, ZigBee, протоколи маршрутизації, mesh-мережі, оптичне позиціонування.

Постановка проблеми. Сучасні безпілотні системи дедалі рідше працюють поодинокі – натовість операції планують із розрахунком на групу апаратів, які діють скоординовано. Такий підхід, відомий як роева парадигма, дозволяє покрити велику територію за короткий час, забезпечити взаємне резервування і підвищити загальну стійкість системи до відмов окремих вузлів. Але за цими перевагами стоїть складна технічна проблема: як організувати надійний зв'язок між десятками або сотнями апаратів, що постійно рухаються у тривимірному просторі?

На відміну від класичної схеми «дрон – наземна станція», де топологія стабільна і передбачувана, рій є динамічною системою. Апарати змінюють взаємне розташування, частина з них може тимчасово втрачати зв'язок із сусідами, а деякі вимушені ретранслювати чужі дані через себе. При цьому різні компоненти місії ставлять різні вимоги до каналу: команди управління потребують мінімальної затримки, відеопотік – високої пропускової здатності, телеметрія – енергоефективності. Знайти технологію, яка однаково добре задовольняла б усім цим вимогам одночасно,

неможливо – а отже, постає завдання їх розумного комбінування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика комунікацій між дронами у складі рою активно досліджується з початку 2010-х років. Фундаментальна робота Бекмезчі та співавторів [1] заклала концептуальну основу, ввівши термін Flying Ad-Hoc Network і систематично описавши, чим FANET відрізняється від наземних MANET та транспортних VANET. Автори показали, що класичні протоколи, розроблені для відносно повільних наземних вузлів, виявляються мало-ефективними в умовах високої мобільності та низької щільності мережі. Ця робота досі залишається відправною точкою для переважної більшості досліджень у даній галузі.

Огляд Санчес-Гарсія та ін. [2] охоплює широкий спектр технологій для багатошляхових повітряних і водних мереж. Автори розглядають не тільки теоретичні аспекти, а й практичні виклики реалізації, включаючи вибір модуляції, організацію mesh-топологій та інструменти тестування. Особливу цінність представляє порівняльний аналіз енергоефективності різних протоколів – аспект, критичний для малих платформ з обмеженою автономністю.

Хайят та ін. [3] детально дослідили можливості інтеграції стільникових мереж у контур управління БПЛА. Автори показали, що 4G LTE вже достатній для базової телеметрії, а 5G відкриває принципово нові можливості завдяки меншій затримці і підтримці massive machine-type communications. Разом із тим у роботі зазначено головне обмеження: наземні базові станції мають антени, орієнтовані донизу для обслуговування наземних користувачів, що суттєво погіршує покриття на висотах польоту БПЛА.

У дослідженні Талеб та співавторів [4] детально розглядається архітектура підтримки сервісів БПЛА у мобільних мережах 5G та майбутніх поколінь. Автори пропонують комплексну структуру, яка для ефективного управління вимагає координації між ключовими учасниками процесу: операторами БПЛА, операторами мобільного зв'язку, хмарними провайдерами та системами управління повітряним рухом дронів (наприклад, UTM). Головний акцент у роботі зроблено на використанні концепції мережевого нарізання (network slicing) та об'єднанні ресурсів через кілька адміністративних доменів різних мобільних операторів.

Питанням маршрутизації присвячено оглядову роботу Арафат та Мох [5], де автори послідовно

порівнюють реактивні, проактивні та гібридні протоколи стосовно БПЛА-мереж. Особливу увагу приділено алгоритмам, які демонструють кращу адаптивність до непередбачуваних змін топології порівняно з класичними рішеннями.

Попри чималий обсяг публікацій, у літературі бракує узагальненого порівняльного аналізу, який би систематизував технології передачі даних у прив'язці до типових сценаріїв застосування роїв та обмежень реальних платформ – що й становить актуальність цього дослідження.

Постановка завдання. Мета статті – систематизація методів бездротової передачі даних для БПЛА-роїв, виявлення переваг і обмежень основних технологій та формулювання практичних орієнтирів для їх вибору залежно від специфіки виконуваної задачі.

Досягнення цієї мети передбачає вирішення кількох взаємопов'язаних завдань. По-перше, слід з'ясувати, чим FANET принципово відрізняється від класичних бездротових мереж і які виклики це створює для розробників. По-друге, необхідно розглянути технології фізичного рівня – від Wi-Fi і ZigBee до стільникових мереж – з точки зору їх придатності для різних типів даних. По-третє, важливо проаналізувати протоколи маршрутизації, адаптовані до високої мобільності вузлів. Нарешті, слід узагальнити практичний досвід побудови гібридних комунікаційних стеків, що поєднують кілька технологій у єдиній системі.

Виклад основного матеріалу. Щоб зрозуміти специфіку комунікацій у БПЛА-роях, варто почати з того, що робить їх принципово відмінними від звичних бездротових мереж. У класичній схемі дрон підключається до наземної станції – топологія проста, відстань передбачувана, зв'язок двосторонній. Рій – зовсім інша картина. Тут немає єдиного центру, натомість кожен апарат одночасно є джерелом даних і ретранслятором для сусідів. Така архітектура, відома як Flying Ad-Hoc Network, повинна самоорганізовуватись буквально на льоту [1, с. 1255]. Вузли постійно рухаються у трьох вимірах зі швидкостями до сотень кілометрів на годину, топологія змінюється кожні кілька секунд, а щільність мережі зазвичай нижча, ніж у наземних MANET [1, с. 1256-1258]. Це означає, що маршрут, знайдений секунду тому, може вже не існувати – і протокол повинен це враховувати.

Технології фізичного рівня можна класифікувати за дальністю покриття та складністю. Wi-Fi на базі стандарту IEEE 802.11 залишається найпоширенішим вибором там, де апарати діють

у межах пари сотень метрів один від одного і є потреба у відеопотоці. Стандарт 802.11s дозволяє організувати mesh-топологію, де вузли автоматично будують маршрути і перемикаються на резервні шляхи при розриві зв'язку [2, с. 48]. Головний недолік Wi-Fi у роєвому контексті – порівняно високе енергоспоживання. Для платформ вагою до кілограма кожен міліампер-год на рахунок, і витратити енергію на підтримку Wi-Fi-модуля в активному режимі не завжди доречно.

ZigBee (IEEE 802.15.4) проектувався для сенсорних мереж, де дані невеликі, а батарея має служити місяцями. У контексті БПЛА-роїв ZigBee ідеально підходить для телеметрії: передача координат, висоти, залишку заряду, швидкості – все те, що не вимагає широкої смуги, але має надходити регулярно і надійно. Модулі типу XBee Pro на частоті 2,4 ГГц забезпечують дальність до 100 метрів на відкритому просторі при споживанні в десятки разів нижчому, ніж у Wi-Fi [2, с. 48–50]. Підтримка mesh-топології і кластерного дерева дозволяє будувати самоорганізовані мережі навіть без централізованого координатора – що критично важливо для децентралізованих роїв.

Стільникові мережі можна використовувати як альтернативу власній інфраструктурі. Використання 4G LTE для зв'язку всередині рою – це підхід, який знімає проблему побудови власної мережі там, де є покриття оператора. Для базової телеметрії вимоги до пропускної здатності є мінімальними і становлять близько 24 кбіт/с, а розмір пакетів керування може складати лише близько 11 байтів [3, с. 2649]. Технології стільникового зв'язку, такі як LTE зі швидкістю передачі даних близько 300 Mbps, цілком здатні забезпечити такі показники з досить низькою затримкою у 5 ms [3, с. 2654]. Водночас 5G відкриває якісно нові можливості: максимальна швидкість до 10 Гбіт/с та затримка менше мілісекунди дозволяє будувати системи з реактивним зворотним зв'язком, а підтримка massive machine-type communications природно відповідає потребам роїв із десятками одночасно підключених апаратів [4]. Головне обмеження полягає в архітектурі самої інфраструктури: базові станції мають антени, які орієнтовані донизу для обслуговування наземних

користувачів, тому на висотах 50–200 метрів сигнал часто нестабільний або взагалі відсутній [3, с. 2653–2655]. Це робить стільникові мережі прийнятним рішенням для міських операцій на невеликих висотах, але малопридатним для польотів за межами міст або на великих висотах.

Системи оптичного позиціонування (наприклад, інфрачервоні камери) демонструють сантиметрову точність у контрольованих умовах [2, с. 48], що задовольняє потребу у високоточному визначенні розташування для роботи у щільних формаціях. Для щільних формацій, де дрони летять на відстані метрів один від одного, така точність є вимогою безпеки – адже помилка навігації може призвести до зіткнення.

Підсумуємо всі вище описані технології фізичного рівня (табл. 1) [2, с. 48–50; 3, с. 2649, 2654; 4].

Дальність, пропускна здатність та затримка у технології Wi-Fi на базі стандарту IEEE 802.11s залежить від кількості вузлів та підключених пристроїв, тому наведення подібної інформації у таблиці не буде відображати реальну картину.

Важливим аспектом фізичного рівня є особливості радіопоширення у середовищі БПЛА. Дослідження показали, що для каналів UAV-to-UAV модель двопробеневого відбиття від поверхні землі є точнішою за модель вільного простору, а на малих висотах виникають так звані сірі зони з підвищеним рівнем замирань [1, с. 1260]. Вибір адекватної моделі замирання залежить від умов місії: модель Релея краще описує канали на малих висотах у щільній забудові, тоді як моделі Накагамі-т та Вейбулла з підвищеними параметрами замирання є більш відповідними для польотів на великих висотах у відкритому просторі [1, с. 1261].

Тип антени є ще одним критичним чинником ефективності комунікацій. Всеспрямовані антени не вимагають інформації про місцезнаходження сусідніх вузлів і прості у застосуванні, проте мають коротшу дальність і вищу схильність до радіозавад. Спрямовані антени забезпечують більшу дальність передачі, вищу просторову повторюваність каналу та кращий захист від навмисних перешкод, але потребують постійного відстеження координат сусідів [1, с. 1261–1262]. У середовищах FANET спрямовані антени мають

Таблиця 1

Нагляне порівняння технологій фізичного рівня

Технологія	Стандарт	Дальність	Пропускна здатність	Затримка	Енергоспоживання
Wi-Fi	802.11s	-	-	-	високе
ZigBee	802.15.4	до 100 м	250 кбіт/с	15 мс	дуже низьке
4G LTE	LTE	-	300 Мбіт/с	5 мс	високе
5G	NR	-	10 Гбіт/с	1 мс	дуже високе

явні переваги: збільшена дальність зменшує кількість ретрансляційних переходів і знижує наскрізну затримку, що є критично важливим для систем моніторингу у реальному часі.

Глибша інтеграція БПЛА із мережами 5G потребує не лише фізичного покриття, а й спеціалізованої архітектурної підтримки. Концепція мережевого нарізання (network slicing) дозволяє оператору виділити для рою БПЛА окремий мережевий зріз із гарантованими параметрами якості обслуговування: заданою максимальною затримкою для командного каналу і мінімальною пропускну здатністю для передачі відео [4, с. 221]. Зріз може охоплювати одночасно ядро мережі, транспортний сегмент, радіодоступ і хмарні ресурси, формуючи наскрізний логічний канал від оператора БПЛА до кожного апарату рою [4, с. 222].

Також велику роль грає архітектура мереж, організація зв'язку всередині рою може будуватись за кількома принципово різними схемами (табл. 2) [1, с. 1262–1264].

Централізована модель передбачає, що всі БПЛА підключені до наземної або повітряної базової станції через канали UAV-to-Infrastructure (U2I). Станція координує обмін даними, приймає рішення про маршрутизацію і видає команди управління. Така архітектура проста в реалізації і добре керується, але має очевидну вразливість: відмова станції паралізує весь рій [1, с. 1262-1264]. Децентралізована модель позбавлена цього недоліку – кожен апарат рівноправний і підтримує прямий зв'язок із сусідами через канали UAV-to-UAV (U2U). Рішення про маршрутизацію приймаються локально, що підвищує стійкість до відмов окремих вузлів. Ієрархічна кластерна архітектура намагається поєднати переваги обох підходів: рій ділиться на групи, всередині кожної є тимчасовий лідер, а обмін між групами йде через лідерів вищого рівня [1, с. 1263-1264]. Такий підхід добре масштабується і зберігає часткову децентралізацію.

Канальний рівень (MAC) також потребує спеціалізованих рішень для FANET. Протокол AMUAV (Adaptive MAC Protocol Scheme for UAVs) надсилає службові пакети через всеспрямовану антену,

а пакети даних – через спрямовану, що одночасно зберігає широке охоплення для управління і ефективну передачу корисного навантаження, покращуючи пропускну здатність, наскрізну затримку та частоту бітових помилок [1, с. 1262]. Інший підхід використовує токен-доступ разом із повнодуплексними радіомодулями та схемою прийому кількох пакетів (multi-packet reception): токенова структура усуває колізії при оновленні інформації про стан каналу та знижує затримку [1, с. 1262]. Оскільки в FANET, на відміну від MANET, обмежень за енергоспоживанням для великих БПЛА практично немає, є можливість використовувати складніше апаратне забезпечення для реалізації таких розвинутих MAC-механізмів.

Протоколи маршрутизації, які адаптовані до польотної динаміки, виграють у класичних протоколів MANET – AODV, DSR, OLSR. Вони розроблялись для наземних вузлів з помірною мобільністю BICSF (табл. 3) [5, с. 99703–99712].

У FANET ці протоколи швидко деградують [5, с. 99701]: маршрут, знайдений AODV секунду тому, може вже не існувати, якщо вузли переміщуються зі швидкістю 50–100 км/год [5, с. 99696]. Реактивні протоколи (AODV, DSR) встановлюють маршрут лише за потреби – це знижує службовий трафік, але збільшує затримку першої передачі [5, с. 99704]. Проактивний OLSR постійно підтримує актуальні таблиці маршрутизації, використовуючи концепцію багатоточкових ретрансляторів (multipoint relays) для зменшення флудингу. Це знижує затримку встановлення з'єднання, але ціною постійного обміну службовими повідомленнями, що робить його неефективним у високодинамічних мережах [5, с. 99703].

Позиційні протоколи маршрутизації (position-based routing) мають суттєву перевагу перед топологічними у мережах БПЛА: замість таблиць маршрутизації вони використовують GPS-координати вузлів, що знижує накладні витрати і підвищує масштабованість [5, с. 99705]. Протокол GPMOR застосовує модель Гаусса–Маркова для прогнозування майбутнього положення сусідніх вузлів і передає пакет тому, хто буде ближчим

Таблиця 2

Архітектури організації зв'язку всередині рою

Архітектура	Канал	Переваги	Недоліки
Централізована	U2I	проста реалізація; добре керується	відмова станції паралізує весь рій
Децентралізована	U2U	висока стійкість до відмов; локальна маршрутизація	складніша координація; вищі вимоги до протоколів
Ієрархічна кластерна	U2I + U2U	добре масштабується; часткова децентралізація	Складніший протокол; накладні витрати на вибір лідера

Порівняння протоколів маршрутизації

Протокол	Тип	Ключова особливість	Переваги	Недоліки
AODV	Реактивний	Маршрути встановлюються лише на вимогу (on-demand)	Низький службовий трафік	Затримка першої передачі
DSR	Реактивний	On-demand, маршрут зберігається у заголовку пакету	Низький службовий трафік	Затримка першої передачі
OLSR	Проактивний	Постійні таблиці маршрутизації; концепція багатоточкових ретрансляторів (MPR)	Низька затримка з'єднання	Постійний службовий трафік; Не ефективний при високій мобільності
Reactive-Greedy-Reactive	Гібридний	Географічне пересилання при наявності зв'язку та AODV при розривах	Адаптивність; Баланс між затримкою і трафіком	Вимагає геоданих
BICSF	Біоінспірований	Оптимальна кластеризація	Найкраща адаптивність;	Складність реалізації

до цілі у прогнозованому часовому вікні, а не тому, хто є найближчим у поточний момент [5, с. 99708]. Для розріджених мереж, де прямий шлях відсутній, протокол LAROD поєднує жадібну пересилку з методом store-carry-and-forward: вузол утримує пакет у буфері і передає його, щойно з'являється відповідний ретранслятор [5, с. 99707]. Такий підхід забезпечує високий відсоток доставки навіть при нерівномірній щільності рою, проте є мало-ефективним для мікро-БПЛА через підвищені вимоги до енергоспоживання.

Гібридні протоколи, такі як Reactive-Greedy-Reactive, поєднують обидва підходи: використовують географічне пересилання там, де є зв'язність, і перемикаються на реактивний режим AODV при розривах маршруту [5, с. 99709]. Перспективним напрямком є біоінспіровані алгоритми – зокрема, на основі мурашиної колонії (Ant Colony Optimization), де «мурашки» (службові пакети) прокладають маршрути аналогічно до того, як комахи шукають їжу [5, с. 99712]. Водночас сучасні рішення, такі як гібридна схема BICSF (на основі поведінки світляків та криля), демонструють кращу адаптивність, дозволяючи ефективніше формувати кластери та знаходити оптимальні шляхи в умовах непередбачуваних змін топології [5, с. 99711]. Такі підходи демонструють кращу адаптивність до непередбачуваних змін топології порівняно з класичними статичними протоколами.

Кластерна маршрутизація (cluster-based routing) добре поєднується з ієрархічною архітектурою мережі і є доцільною для великих роїв. У протоколі CBRP зона операцій поділяється на квадратні осередки, лідер кожного осередку відповідає за маршрутизацію до базової станції і зменшує потребу у розгалуженому пошуку шляхів [5, с. 99710]. Схема BICSF розширює цей під-

хід гібридним алгоритмом оптимізації: алгоритм GSO формує кластери та обирає лідера з урахуванням залишкового заряду, а алгоритм КН забезпечує адаптивне управління складом кластера упродовж місії [5, с. 99711]. Важливим відкритим питанням залишається безпека маршрутизації: більшість існуючих протоколів не передбачають захисту від зовнішніх атак – зокрема, підробки маршрутних пакетів та відмови у обслуговуванні [5, с. 99715]. Виняток становить протокол PASER, який підтримує автентифікацію вузлів і здатний динамічного виявлення та ізоляції ненадійних вузлів в мережі рою [5, с. 99709].

Важливою складовою підтримки рою у мережах 5G є технологія периферійних обчислень (Multi-access Edge Computing, MEC). Розміщення програмного контролера польоту безпосередньо на межовому вузлі поблизу базової станції, а не у віддаленому хмарному центрі обробки даних, дозволяє суттєво знизити затримку між апаратом і контролером та підвищити надійність командного каналу – що є критично важливим для реактивних систем керування роєм [4, с. 223]. Застосування методів машинного навчання до зібраних даних телеметрії і завантаження мережі дає змогу прогнозувати потребу в ресурсах і автоматично масштабувати хмарну інфраструктуру ще до того, як виникне перевантаження [4, с. 224].

Транспортний рівень FANET становить окрему дослідницьку проблему. Традиційний протокол TCP є малоприматним у середовищах FANET через часті розриви з'єднань, значну затримку поширення і нестаціонарну якість каналу [1, с. 1264]. Стандарт JAUS (Joint Architecture for Unmanned Systems) пропонує спеціалізоване транспортне рішення – протоколи JTCP/JUDP, побудовані поверх TCP/UDP і адаптовані до особливостей безпілотних систем усіх типів: повітряних,

наземних та морських [1, с. 1264]. Паралельно стандарт НАТО STANAG 4586 визначає єдиний транспортний протокол для міжнародних мереж БПЛА, забезпечуючи взаємодію між наземними станціями управління, повітряними апаратами і системами командування C4I [1, с. 1265]. Разом ці стандарти формують нормативну основу, без якої неможлива сумісна робота роїв у міжнародних операціях.

Багатошляхова маршрутизація (multipath routing) є практичним інструментом підвищення стійкості рою до навмисних завад. Протокол JarmRout поєднує три метрики при виборі шляхів: якість радіоканалу за рівнем RSSI, завантаженість буфера MAC-рівня та просторову відстань між альтернативними маршрутами [5, с. 99710]. Просторова розв'язка шляхів гарантує, що одночасне придушення всіх маршрутів потребує від злоумисника значно ширшої зони подавлення, а частина пакетів доходить до адресата навіть в умовах активних перешкод. Разом з тим більшість поширених симуляторів – OPNET, NS-2 та NS-3 – не підтримують тривимірну комунікацію і не моделюють спеціалізовані канали між БПЛА [5, с. 99714]. Це свідчить про потребу у спеціалізованому симуляторі, здатному одночасно моделювати динаміку руху апаратів і мережевий стек FANET.

Крос-рівнева взаємодія є перспективним інструментом підвищення продуктивності FANET. Архітектура IMAC-UAV+DOLSR координує фізичний, каналний і мережевий рівні через спільний набір параметрів стану, що дозволяє динамічно коригувати налаштування передачі залежно від просторової орієнтації апарату (нахил, крен, ризикання) і тим самим скорочує наскрізну затримку порівняно з незалежним налаштуванням рівнів [1, с. 1265]. Алгоритм meshed-tree поєднує функції MAC-рівня і мережевого рівня в єдиному протоколі: він одночасно формує кластери, маршрутизує дані до лідерів кластерів і розподіляє часові слоти у TDMA-структурі, що

суттєво покращує частку успішно доставлених пакетів та наскрізну затримку [1, с. 1265]. Таким чином, крос-рівневий підхід дозволяє отримати синергетичний ефект, недосяжний при ізольованій оптимізації окремих рівнів.

Висновки. Проведений аналіз показує, що комунікація всередині БПЛА-рою – це завдання, яке не має єдиного універсального рішення. Кожна технологія займає свою нішу: Wi-Fi забезпечує високу пропускну здатність на коротких відстанях; ZigBee пропонує енергоефективну телеметрію; оптичні системи позиціонування дозволяють утримувати тісну формацію завдяки сантиметровій точності; стільникові мережі знімають проблему побудови власної інфраструктури там, де є покриття оператора.

Найбільш надійні практичні системи будуються не навколо однієї технології, а навколо їх продуманої комбінації. Гібридний комунікаційний стек – наприклад, ZigBee для обміну телеметрією плюс Wi-Fi для локального відеообміну та оптичні сенсори для точного утримання формації – покриває спектр потреб без компромісів у будь-якому окремому аспекті. Протоколи маршрутизації мережевого рівня також потребують адаптації до високої мобільності вузлів: класичні рішення типу AODV або OLSR дають прийнятні результати лише після модифікації, а найкращі показники демонструють гібридні підходи.

Перспективи подальших досліджень лежать у трьох площинах. По-перше, розробка протоколів, здатних масштабуватися до роїв із сотнями апаратів без суттєвої деградації якості зв'язку. По-друге, оптимізація енергоспоживання на рівні маршрутизації для підвищення загальної автономності вузлів під час тривалих місій. По-третє, побудова уніфікованих архітектур простір–повітря–земля, де супутниковий, стільниковий та внутрішньороевий зв'язок органічно поєднуються в рамках єдиної керованої інфраструктури – що особливо актуально для операцій за межами зони покриття наземних мереж.

Список літератури:

1. Bekmezci İ., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, No. 3. P. 1254-1270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>
2. Sánchez-García J., García-Campos J. M., Arzamendia M. et al. A survey on unmanned aerial and aquatic vehicle multi-hop networks: Wireless communications, evaluation tools and applications. *Computer Communications*. 2018. Vol. 119. P. 43-65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2018.02.002>
3. Hayat S., Yanmaz E., Muzaffar R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, No. 4. P. 2624-2661. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2560343>
4. Taleb T., Ksentini A., Hellaoui H., Bekkouche O. On supporting UAV based services in 5G and beyond mobile systems. *IEEE Network*. 2021. Vol. 35, No. 4. P. 220-227. DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.021.2000358>
5. Arafat M. Y., Moh S. Routing protocols for unmanned aerial vehicle networks: A survey. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 99694-99720. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930813>

Sereda S.S., Kravchenko P.O. METHODS OF WIRELESS DATA TRANSMISSION BETWEEN UNMANNED AERIAL VEHICLES IN A SWARM

This article explores modern methods and technologies of wireless data transmission between Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) within a swarm, which is a critical issue for ensuring effective drone coordination and interaction while performing various tasks. It examines the fundamental concepts of building Flying Ad-Hoc Networks (FANET), which are characterized by high spatial node mobility, low network density, and rapid topology changes, distinguishing them from traditional MANETs and vehicular VANETs.

Short-range technologies are analyzed in detail, such as Wi-Fi based on the IEEE 802.11 standard with a mesh topology for fast video transmission, and ZigBee (IEEE 802.15.4) for efficient power consumption during telemetry transmission with a range of up to 100 meters. The article considers the use of optical positioning systems to ensure safety in dense formations, as well as the potential integration of 4G LTE and 5G networks with bandwidths up to 10 Gbps and latency under 1 ms to support machine-to-machine (M2M) communications. Special attention is given to FANET routing protocols, including reactive protocols like AODV and DSR that establish routes strictly on-demand, the proactive OLSR protocol featuring the concept of multipoint relays, and a hybrid Reactive-Greedy-Reactive approach. UAV swarm network architectures are investigated, namely: centralized architectures using base stations, decentralized ones with direct UAV-to-UAV links, and hierarchical networks supporting node clustering. Energy efficiency issues aimed at extending flight time are also addressed.

The prospects of using satellite and cellular networks for operating UAVs over extremely long distances have been analyzed. The research results indicate that the choice of the optimal data transmission method depends on the various requirements of the specific task, which may include communication range, data transfer rate, energy efficiency, and so forth. Hybrid approaches and bio-inspired algorithms adapt better to topology changes in highly dynamic networks. They provide the highest reliability and flexibility for the complex tasks facing UAV swarms.

Keywords: UAV swarm, wireless data transmission, FANET, Wi-Fi, ZigBee, routing protocols, mesh networks, optical positioning.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Сколець С.С.

<https://orcid.org/0000-0002-2589-1001>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кравчук С.О.

<http://orcid.org/0000-0002-4118-0226>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ МЕХАНІЗМІВ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОГО СЕГМЕНТА НА E2E-QoS МОБІЛЬНОГО ТРАФІКУ В МЕРЕЖАХ 4G/5G

Період масового впровадження технологій 5G вимагає прецизійного узгодження роботи радіо-сегмента та програмно-керованої транспортної інфраструктури. У даній роботі представлено метод комплексної оцінки наскрізної якості обслуговування (E2E QoS), що базується на врахуванні взаємозв'язку між фізичними параметрами радіоканалу та логікою SDN-маршрутизації. Практична реалізація підходу здійснена шляхом інтеграції симулятора ns-3, відповідального за моделювання RAN, та емулятора Mininet, що відтворює функціонування програмно-визначеної транспортної мережі. Запропонований інструментарій дозволив встановити релевантні показники пропускної здатності, латентності та джитера для різних частотних діапазонів і сценаріїв розповсюдження сигналу. Особливу увагу приділено режимам інтенсивного навантаження, коли оператор постає перед необхідністю впровадження пріоритизації критичних потоків даних. У цих умовах метод забезпечує об'єктивну оцінку ефективності адаптивних SDN-політик порівняно з конвенційними алгоритмами маршрутизації. Оптимальне функціонування мережі 5G за таких обставин безпосередньо залежить від раціонального вибору частотного спектра та конфігурації черг обслуговування, що потребує одночасного вирішення завдань моделювання радіоінтерфейсу, інтеграції середовищ та багатофакторного аналізу метрик QoS. Для верифікації впливу параметрів RAN на підсумкову якість сервісів оцінено спектральну ефективність та стійкість з'єднання в умовах відсутності прямої видимості (NLoS). Експлуатаційні показники E2E QoS визначено на інтервалі моделювання 60 секунд із урахуванням динамічної зміни схем модуляції (від QPSK до 256-QAM) та варіативності трафіку різних типів. Аналіз ефективності транспортного сегмента базується на порівнянні стратегій Shortest Path та QoS-based. Такий підхід враховує, що при утилізації каналів понад 75% критичний URLLC-трафік потребує виділення ізольованих черг для мінімізації затримок. Підсумковим елементом дослідження є розроблений метод оцінювання ймовірнісних показників інтегрованої системи, що дозволяє деталізувати множинні компоненти наскрізної затримки в тракті «користувач – послуга».

Ключові слова: наскрізне моделювання, ефективність, якість обслуговування, програмно-визначені мережі, радіодоступ, мережі 4G/5G, інтеграція ns-3 та Mininet.

Постановка проблеми. Сучасні мережі 4G/5G характеризуються високою гетерогенністю архітектури, що об'єднує сегменти радіодоступу (RAN), транспортну інфраструктуру та ядро [1]. Забезпечення наскрізної якості обслуговування (E2E-QoS) у таких системах ускладнюється суперечливими вимогами нових сервісів, де сценарій eMBB потребує високої пропускної здатності (від 1 Гбіт/с), URLLC – наднизької затримки

(<1 мс) при надійності 99,999%, а mMTC – підтримки до 10^6 пристроїв/км². Ключова проблема криється у детермінованому впливі параметрів радіоканалу (діапазони <6 ГГц чи 26 ГГц, умови LoS/NLoS, схеми модуляції MCS до 256-QAM) на характеристики трафіку, що надходить у транспортний сегмент.

Попри здатність віртуалізованих транспортних мереж з SDN-керуванням (OpenFlow 1.3)

динамічно адаптуватися до змін через пріоритезацію потоків та зміну маршрутів, взаємодія між радіосегментом і транспортом залишається недостатньо дослідженою [2]. Традиційний фрагментарний підхід, де RAN та транспортний сегмент аналізуються ізольовано, не дозволяє оцінити реальні E2E-QoS (пропускну здатність, затримку, джитер, PDR) на шляху від абонента до сервісу. Наразі спостерігається дефіцит відтворюваних та відкритих моделей, які б інтегрували прецизійне моделювання радіодоступу (ns-3) із гнучкою SDN-емуляцією (Mininet) для кількісного аналізу впливу параметрів мережі на якість обслуговування змішаного трафіку. Усунення цієї прогалини є критичною умовою для розробки ефективних методів віртуалізації транспортного сегмента, спрямованих на підвищення E2E-QoS у мережах 4G/5G та створення технологічного підґрунтя для майбутніх стандартів 6G.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний науковий дискурс у сфері телекомунікацій зосереджений на пошуку механізмів гармонізації процесів у динамічних сегментах радіодоступу (RAN) та програмно-керованих транспортних мережах (SDN). Окремий вектор вишукувань спрямований на подолання технологічного розриву між фізичними параметрами передачі сигналів у діапазонах 5G NR та логікою віртуалізованого керування мережевими ресурсами. Дослідження, представлене у статті, лежить у площині розробки інтегрованих моделей для верифікації наскрізної (E2E) продуктивності систем, що функціонують в умовах гетерогенного трафіку та змінного стану радіоканалів.

Перший напрямок досліджень присвячено вивченню впливу параметрів радіоканалу на продуктивність 5G. Ф. Дж. Лавакка та ін. (F. G. Lavacca et al.) [3] за допомогою ns-3 оцінили технології 5G (NSA) порівняно з LTE, інтегрувавши SDN-транспорт. Автори реалізували SDN-контролер з підтримкою OpenFlow 1.3 для топологічного відкриття та маршрутизації (Shortest Path та Vertical-Aware). Результати підтвердили приріст пропускну здатності RAN ($G_{\text{RAT}} \approx 1,33$ для одного користувача та $\approx 1,6$ для 10 – 100 осіб), а SDN-політики дозволили досягти транспортної ефективності $\eta_T = 1$, забезпечуючи вимоги eMBB без розширення каналів. Відзначено роль SDN-маршрутизації у мінімізації затримки та джитера.

Другий напрямок охоплює SDN-трансформацію backhaul/fronthaul сегментів. У праці С. Хорсандру та ін. (S. Khorsandroo et al.) [4] обґрунтовано переваги гібридних SDN-

архітектур для гнучкого керування ресурсами та QoS. С. Аммар та ін. (S. Ammar et al.) [5] проаналізували роль SDN, NFV та слайсингу в мережах 6G для ізоляції трафіку та оптимізації надійності. У вузькоспеціалізованих доменах Н. Муавад (N. Mouawad) [6] запропонував SDN-керування мобільністю для V2X-мереж, а М. Бешлей та ін. (M. Beshley et al.) [7] розробили алгоритми «smart queue» для NB-IoT, що знизили наскрізну затримку в 1.17–2.12 раза порівняно з базовими сценаріями.

Третій напрямок сфокусовано на комплексному поєднанню сегментів. У роботі Й.-Б. Ліна (Y.-B. Lin) [8] продемонстровано застосування механізму trTCM для гарантування швидкостей (CIR) у класах MBB та IoT із виходом на $\sim 100\%$ пропускну здатність. Ефективність QoS на базі слайсингу та віртуалізації підтверджено також у працях К. С. Ібарра-Ланчерос (K. S. Ibarra-Lancheros) [9], Р. Ботез (R. Botez) [10], М. С. Абуд (M. S. Abood) [11] та Р. В. Коельо (R. W. Coêlho) [12].

Попри значний прогрес у предметній галузі, більшість робіт мають фрагментарний характер (окремий аналіз RAN або SDN) і низьку відтворюваність. Існує дефіцит E2E-моделей, що інтегрують прецизійне моделювання радіоінтерфейсів (ns-3) із гнучкістю SDN-емуляції (Mininet). Залишається малодослідженим кумулятивний вплив фізичних параметрів 5G NR (NLoS, mmWave, MCS) та логічних SDN-політик на наскрізні QoS для різноманітного трафіку (eMBB, URLLC, змішаний). Заповненню цієї прогалини і присвячено наше дослідження.

Постановка завдання. Метою статті є побудова та експериментальна перевірка наскрізної (E2E) моделі мережі для кількісної оцінки впливу параметрів радіодоступу (модуляція, умови розповсюдження) та SDN-політик на підсумкові QoS користувача. Для досягнення окресленої мети було поставлено наступні послідовні завдання:

1. Верифікувати архітектуру наскрізної (E2E) моделі, що забезпечує інтеграцію засобів прецизійного моделювання сегмента радіодоступу (ns-3) із гнучкою емуляцією програмно-керованої транспортної мережі (Mininet) на основі уніфікованого набору метрик QoS.

2. Реалізувати та дослідити сценарії функціонування мережі для різноманітних типів трафіку (eMBB, URLLC та змішаних потоків) шляхом кількісної оцінки впливу варіативності параметрів RAN та різних SDN-політик маршрутизації на підсумкову якість обслуговування.

3. Провести порівняльний аналіз отриманих даних для виявлення закономірностей взаємодії між радіо- та транспортним сегментами, на основі чого сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації віртуалізованих мереж 4G/5G.

Виклад основного матеріалу. Для висвітлення поставленої наукової задачі запропонована комплексна наскрізна (*End-to-End*, *E2E*) модель, що базується на синергії двох спеціалізованих середовищ моделювання: дискретно-подієвого симулятора *ns-3* та емулятора програмно-визначених мереж *Mininet*. Вибір відповідної гібридної архітектури дає змогу подолати обмеження традиційних методів у яких сегменти радіодоступу та транспортної мережі розглядаються у ролі ізольованих доменів. Запропонована структура покликана забезпечити можливість дослідження кумулятивного впливу фізичних процесів у радіоканалі на логіку керування трафіком у транспортному сегменті. Загальна архітектура інтегрованої системи, що ілюструє взаємодію сегментів RAN та SDN-транспорту в єдиному циклі моделювання, представлена на рис. 1.

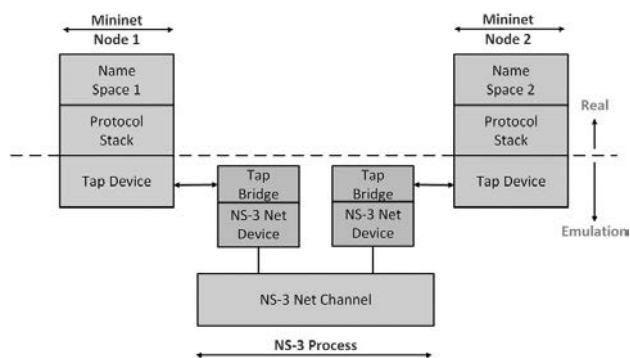


Рис. 1. Архітектура інтеграції симуляторів *ns-3* та *Mininet* для *E2E*-моделювання

На відміну від традиційних підходів, де сегменти радіодоступу та транспортної мережі аналізуються окремо [3; 4], запропонована гібридна архітектура дозволяє комплексно оцінити кумулятивний вплив фізичних характеристик радіоканалу на ефективність SDN-політик у транспортному сегменті завдяки наступним функціональним компонентам:

1. *Сегмент радіодоступу (RAN)*. Реалізований на базі спеціалізованого модуля *5G-LENA* в середовищі *ns-3*. Даний компонент забезпечує прецизійне моделювання обладнання користувача (UE) та базових станцій (gNB/eNB), охоплюючи повний стек протоколів NR (New Radio). Модель дозволяє імітувати роботу мережі у частотних діапазонах sub-6 GHz та mmWave (26 GHz) з ураху-

ванням складних умов розповсюдження сигналу (LoS/NLoS) та адаптивного вибору схем модуляції MCS (від QPSK до 256-QAM) [7].

2. *Транспортна SDN-мережа*. Побудована в середовищі *Mininet* за тривірневою ієрархічною топологією (ядро, агрегація, доступ) [5]. Використання програмних комутаторів *Open vSwitch* у поєднанні із зовнішнім SDN-контролером (*Ryu/ONOS*) дозволяє реалізувати програмовані політики керування потоками на основі протоколу *OpenFlow 1.3*. Завдяки обраним рішенням стає можливою динамічна зміна маршрутів та пріоритезація трафіку з урахуванням поточного стану каналів зв'язку.

3. *Механізм системної інтеграції*. Фундаментальний принцип поєднання середовищ полягає у створенні віртуального «містка» (bridge) на рівні операційної системи. Трафік, що генерується в *ns-3*, проходить через віртуальний шлюз PGW (Packet Data Network Gateway), де він інкапсулюється в реальні Ethernet-пакети та спрямовується безпосередньо в порти комутаторів *Mininet*. Схема забезпечує автентичне збереження часових інтервалів та патернів втрат пакетів, що виникли в радіоканалі, під час їхньої подальшої обробки SDN-інфраструктурою.

Математичний опис функціонування розробленої моделі базується на аналізі часових характеристик проходження пакетів від джерела до отримувача. У підсумку якість обслуговування визначається наскрізною затримкою, тобто часом проходження пакета від джерела до отримувача через усі сегменти мережі. Цей показник розкладається на три складові:

$$T_{E2E} = T_{RAN} + T_{SDN} + T_{Proc}. \quad (1)$$

Тобто можна сказати, що загальна затримка дорівнює сумі: часу в радіоканалі (T_{RAN}), часу в транспортній мережі (T_{SDN}) та часу обробки в вузлах (T_{Proc}). Подібний розподіл показників забезпечує можливість детального аналізу внеску кожного домену в загальну наскрізну затримку. Завдяки цьому стає можливим визначення конкретного вузла або сегмента, який обмежує швидкість роботи системи при погіршенні мережевих параметрів.

Зауважимо, що радіоканал у цій моделі залишається найбільш мінливим компонентом. Його затримка залежить від відстані до базової станції, перешкод та обраної швидкості передачі. Для моделювання використано стандарт 3GPP TR 38,901, який описує втрати сигналу в діапазоні 26 ГГц:

$$PL_{NLoS} = 32,4 + 31,9 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(fc). \quad (2)$$

Рівняння (2) формалізує вплив дистанції та частоти на рівень Path Loss у складних умовах міського середовища без прямої видимості. Параметр 31,9 вказує на інтенсивне розсіювання та поглинання хвиль, що значно перевищує втрати у вільному просторі. Через енергетичний дефіцит, зумовлений NLoS, використання багаторівневих схем модуляції на кшталт 256-QAM стає неможливим, що зумовлює перехід до базової QPSK. Подібна вимушена деградація модуляційної схеми безпосередньо корелює з падінням швидкості потоку в 7–8 разів, що необхідно враховувати при плануванні транспортного сегмента. Розглянемо спектральна ефективність – ключовий показник, що визначає, скільки бітів на секунду можна передати на один герц смуги:

$$SE = \log_2(1 + SINR). \quad (3)$$

З рівняння випливає, що чим краще відношення сигналу до шуму (SINR), тим вища спектральна ефективність. При SINR = 20 дБ (хороший сигнал) $SE \approx 6,6$ біт/с/Гц, що відповідає 256-QAM. При SINR = 5 дБ (слабкий сигнал) SE падає до 1,7 біт/с/Гц (QPSK). Важливим етапом дослідження стало визначення умов функціонування RAN, оскільки саме вони визначають профіль трафіку, що надходить до SDN-контролера.

Транспортна мережа вносить затримку через комутацію пакетів та очікування в чергах. Для аналізу пріоритетних черг URLLC-трафіку використано класичну модель системи масового обслуговування:

$$W_q = \frac{\lambda E[s^2]}{2(1-\rho)}. \quad (4)$$

Середній час очікування пакета в черзі (W_q) залежить від інтенсивності надходження трафіку λ (пакетів/с), середнього часу обслуговування $E[s]$ та завантаження каналу ρ (частки зайнятого часу). Квадрат у чисельнику ($E[s^2]$) відображає варіабельність розмірів пакетів: чим більше розкид (eMBB з великими пакетами vs URLLC з малими), тим довші черги. При завантаженні каналу $\rho > 0,8$ знаменник прямує до нуля, і затримка різко зростає. Саме тому важлива пріоритезація: виділення окремої черги для URLLC із вищим пріоритетом дозволяє обслуговувати критичні пакети швидше, не чекаючи в загальній черзі за eMBB.

Визначення експлуатаційних умов RAN є фундаментальним етапом моделювання, оскільки ці параметри безпосередньо задають профіль навантаження на SDN-контролер у транспортній мережі. Запропонована система оцінювання інтегрована в ієрархічну структуру, що поєднує сегменти радіодоступу, транспорту та ядра мережі. Повна схема цієї архітектури з відображенням функціональних зон представлена на рис. 2.

На відміну від традиційних підходів, де кожен сегмент оптимізується окремо, запропонована модель дозволяє відстежити, як якість радіоканалу впливає на рішення SDN-контролера. Наприклад, при погіршенні умов LoS до NLoS у діапазоні 26 ГГц швидкість потоку падає, змінюється характер трафіку, що надходить до транспортної мережі, і виникає потреба в перерозподілі ресурсів. Роз-

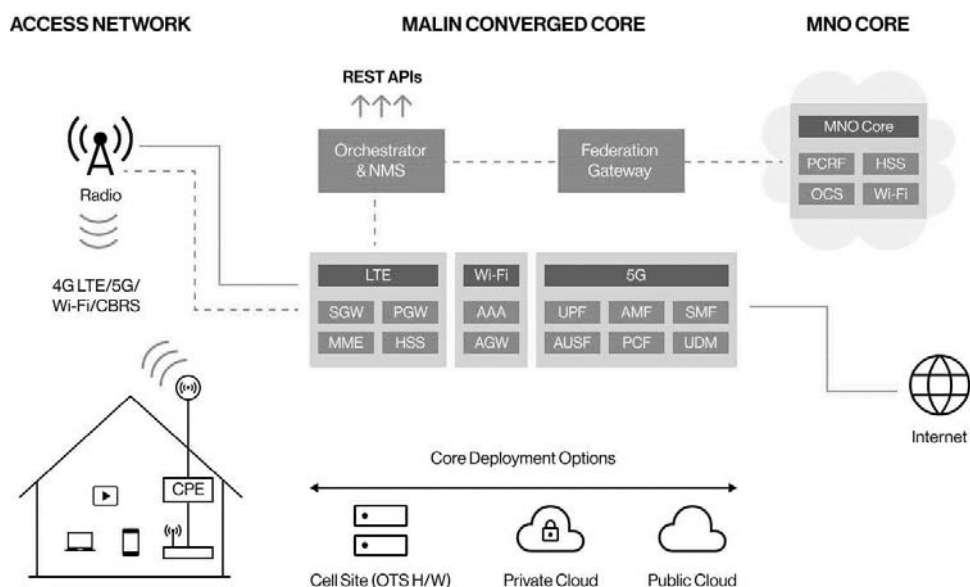


Рис. 2. Загальна архітектура 5G-мережі з виділенням сегментів RAN, транспортної мережі та ядра

глянемо Конфігурацію SDN-політик. У транспортному сегменті реалізовано два типи логіки маршрутизації.

Політика А (Shortest Path), що уявляє з себе стандартний алгоритм Дейкстри, що максимізує пропускну здатність шляху без врахування пріоритетів трафіку.

Політика Б (QoS-based), представлена адаптивним механізмом, що використовує пріоритетні черги для URLLC-трафіку через механізм set queue action OpenFlow 1,3 [11]. Формула (4) у цьому контексті показує, що при завантаженні каналу $\rho > 0,8$ відбувається різке зростання затримки. А виділення окремої черги для URLLC, у свою чергу, дозволяє обійти це обмеження для критичних пакетів.

Дослідження охоплює три типові сценарії навантаження мережі. Перший відтворює поведінку eMBB-сервісів – масове передавання даних, таке як відео у високій роздільній здатності або завантаження файлів. Для цього моделюються TCP-потоки з постійною швидкістю 50 Мбіт/с, де кожен пакет містить 1500 байт інформації. Другий сценарій імітує URLLC – критичні додатки, що потребують миттєвої реакції, наприклад керування промисловими механізмами або автономним транспортом. Тут використовуються короткі UDP-пакети по 100 байт, що надсилаються кожен мілісекунду. Третій варіант поєднує обидва типи трафіку одночасно: два потоки eMBB працюють паралельно з чотирма потоками URLLC, що дозволяє оцінити, як вони конкурують за ресурси мережі. Тривалість кожного експерименту становить 60 секунд – цього достатньо для досягнення стаціонарного режиму та отримання репрезентативних результатів.

Ефективність системи оцінюється за п'ятьма ключовими показниками. Пропускна здатність відображає реальну швидкість доставки даних кінцевому користувачеві. Наскрізна затримка вимірює час проходження пакета від джерела до отримувача через усі сегменти мережі – радіоінтерфейс, транспорт і обробку в ядрі. Джитер характеризує стабільність цього часу:

$$\text{Jitter} = \sqrt{E[T^2]} - (E[T])^2. \quad (5)$$

З рівняння видно, що чим менше коливань, тим більше передбачувана поведінка мережі, що критично для чутливих до затримок додатків. Коефіцієнт доставки показує, який відсоток пакетів успішно долає весь шлях без втрат. Якщо окремі пакети приходять через 5 мс, а інші через 25 мс (високий джитер), система керування не може покладатися на передбачуваність мережі. SDN-політики пріоритезації саме й покликані зменшити цю варіабельність для критичного трафіку. Нарешті, спектральна ефективність вказує, наскільки раціонально використовується дорогий і обмежений радіоресурс – смуга частот.

Отримані експериментальні дані демонструють нелінійний характер взаємодії між параметрами радіодоступу та підсумковою якістю обслуговування. Результати моделювання eMBB-трафіку в різних умовах RAN зведено в табл. 1.

Представлені результати свідчать про принципову відмінність у поведінці діапазонів sub-6 ГГц та mmWave. У діапазоні 26 ГГц при прямій видимості досягається рекордна пропускна здатність 420 Мбіт/с завдяки застосуванню 256-QAM та широкій смузі 100 МГц. Водночас цей же діапазон демонструє катастрофічне падіння продуктивності при втраті прямої видимості: швидкість падає до 58 Мбіт/с, що у 7,2 раза менше за ідеальні умови та на 70% нижче за показник діапазону 3,5 ГГц у аналогічних умовах NLoS.

Результати можна пояснити різким зростанням загасання сигналу в mmWave-діапазоні при блокуванні траси, що формула (2) відображає коефіцієнтом 31,9 замість 21,0 для LoS. Система адаптивно знижує MCS до QPSK, зберігаючи зв'язок, але ціною спектральної ефективності 0,9 біт/с/Гц проти 6,8 біт/с/Гц у сприятливих умовах. Подібна варіабельність продуктивності mmWave узгоджується з даними роботи [7] та має критичне значення для планування транспортного сегмента: мережа повинна бути готовою до раптових змін інтенсивності трафіку при переміщенні користувача між зонами LoS та NLoS.

Другий блок експериментів був спрямований на оцінку ефективності SDN-політик у сценарії змішаного трафіку. При завантаженні каналів на рівні 75% ($\rho \approx 0,75$) було порівняно стандартну

Таблиця 1

Порівняння продуктивності eMBB у різних сценаріях RAN

Сценарій	MCS	Throughput, Мбіт/с	E2E Delay, мс	PDR, %	SE, біт/с/Гц
3,5 ГГц, LoS	64-QAM	185	12	99,8	5,3
3,5 ГГц, NLoS	16-QAM	95	18	98,5	2,7
26 ГГц, LoS	256-QAM	420	8	99,9	6,8
26 ГГц, NLoS	QPSK	58	35	94,2	0,9

маршрутизацію Shortest Path з адаптивною QoS-based політикою. Особливу увагу приділено джитеру (варіація затримки) σ_T обчислюється як стандартне відхилення затримки за формулою (5).

Для кількісної оцінки запропонованих рішень було проведено серію експериментів у стресовому сценарії за умови завантаження мережевих ресурсів на 75%. Порівняльний аналіз класичної стратегії Shortest Path та розробленої QoS-орієнтованої політики дозволив визначити ступінь оптимізації ключових параметрів для різних класів трафіку. Зведені результати цього тестування, що демонструють переваги адаптивного керування для критичних сервісів, представлено в табл. 2.

Таблиця 2
Порівняння SDN-політик у змішаному сценарії (перевантаження 75%)

Метрика	Shortest Path	QoS-based	Покращення
URLLC E2E Delay, мс	25	15	40%
URLLC Джитер, мс	8	4	50%
URLLC PDR, %	96,5	99,1	2,6%
eMBB Throughput, Mbit/c	142	138	-2,8%

Аналіз даних представлених у таблиці 2 дозволяє зробити висновок про суттєву перевагу QoS-based підходу для критичного трафіку. Застосування пріоритетних черг зменшило наскрізну затримку URLLC-пакетів з 25 мс до 15 мс, тобто на 40%. Що ще важливіше, джитер скоротився наполовину – з 8 мс до 4 мс. Це означає, що система стала значно передбачуванішою: замість розкиду затримок у широкому діапазоні критичні пакети стабільно проходять за майже однаковий час. Покращення PDR на 2,6% (з 96,5% до 99,1%) додатково підтверджує надійність такого підходу.

Варто звернути увагу на механізм досягнення цього ефекту. На рис. 3 показано архітектуру взаємодії компонентів SDN у середовищі Mininet. SDN-контролер (Ryu) підтримує зв'язок з програмними комутаторами Open vSwitch через протокол OpenFlow 1.3. При отриманні пакета комутатор звертається до контролера за інструкцією щодо маршрутизації. У випадку QoS-based політики контролер аналізує поле DSCP (Differentiated Services Code Point) у заголовку IP-пакета, що надійшов з ns-3 через інтеграційний міст. Пакети URLLC маркуються вищим пріоритетом і спрямовуються до окремої черги з мінімальним часом очікування, тоді як eMBB-пакети обслуговуються за принципом «найкращих зусиль» у загальній черзі.

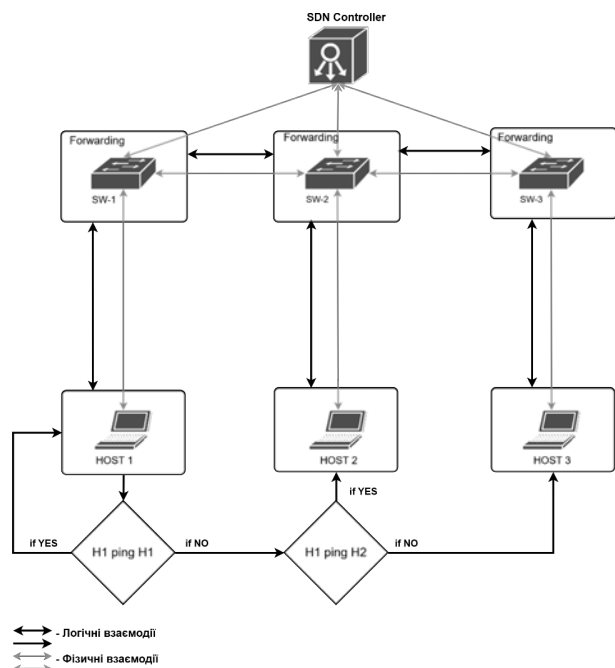


Рис. 3. Детальна схема взаємодії SDN-контролера, комутаторів та хостів у Mininet

Ціна запропонованого покращення полягає у незначному зниженні пропускної здатності eMBB з 142 Мбіт/с до 138 Мбіт/с, тобто на 2,8%. Цей компроміс цілком прийнятний, оскільки eMBB-сервіси за своєю природою толерантні до затримок, тоді як URLLC-додатки вимагають жорсткого дотримання часових обмежень. Отримані результати доводять, що інтелектуальне керування транспортним сегментом здатне компенсувати негативні наслідки нестабільності радіоканалу. Навіть коли якість з'єднання в діапазоні 26 ГГц погіршується через втрату прямої видимості, правильно налаштовані SDN-політики зберігають прийнятний рівень обслуговування для критичних додатків.

Висновки. Проведене дослідження спрямоване на подолання методологічного розриву між аналізом радіосегмента та транспортної інфраструктури в мережах 4G/5G. Традиційний підхід, за якого ці домени розглядаються ізольовано, не дає змоги повноцінно оцінити детермінований вплив фізичних процесів у радіоканалі на ефективність політик керування трафіком. Запропонована гібридна архітектура, що поєднує симулятор ns-3 для моделювання RAN та емулятор Mininet для дослідження SDN-транспорту, дала змогу встановити кількісні закономірності такої взаємодії.

До ключових результатів дослідження належать такі положення.

1. **Специфіка розповсюдження хвиль у mmWave-діапазоні.** Показано, що діапазон 26 ГГц

характеризується принципово відмінною динамікою залежно від умов прямої видимості. В сценарії LoS досягнуто пропускної здатності 420 Мбіт/с за спектральної ефективності 6,8 біт/с/Гц, що істотно перевищує показники смуги sub-6 ГГц. Водночас у випадку NLoS швидкість передачі зменшується до 58 Мбіт/с, що приблизно на 70% нижче порівняно з діапазоном 3,5 ГГц за аналогічних умов. Така деградація зумовлена експоненціальним зростанням загасання сигналу в міліметровому діапазоні, що у формулі (2) відображено підвищеним коефіцієнтом поглинання (31,9). Практичний аспект отриманих результатів полягає в необхідності підвищення щільності розміщення базових станцій або впровадження альтернативних маршрутів поширення сигналу для мінімізації зон NLoS.

2. Ефективність адаптивного керування трафіком.

Встановлено, що застосування SDN-політик пріоритезації здатне компенсувати негативний вплив нестабільності радіоканалу на показники QoS. У сценарії змішаного навантаження (75% утилізації каналу) використання QoS-based підходу забезпечило зменшення затримки URLLC-пакетів на 40% (з 25 мс до 15 мс) та джитера на 50% порівняно зі стандартним алгоритмом Shortest Path. При цьому зниження пропускної здатності eMBB-потоків не перевищило 2,8%, що підтверджує ефективність і збалансованість розподілу ресурсів. Досягнутий ефект пояснюється централізованим керуванням чергами на основі протоколу OpenFlow 1.3, що забезпечує пріоритетну обробку критичних пакетів у вузлах комутації.

3. Ідентифікація критичних ланок системи.

Запропонована наскрізна (E2E) модель забезпечує можливість виявлення «вузьких місць» на різних ієрархічних рівнях мережі. Використання аналітичного розкладу загальної затримки (формула (1)) дозволяє диференціювати напрями оптимізації: підвищення SINR у радіоканалі, масштабування транспортної мережі в умовах перевантаження або нарощування обчислювальних ресурсів вузлів обробки.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні методу інтеграції гетерогенних середовищ моделювання із забезпеченням часової когерентності трафіку під час переходу від RAN до SDN-транспортного сегмента. На відміну від підходів, орієнтованих на аналіз окремих доменів, запропонований метод дозволяє досліджувати їхню кумулятивну взаємодію в межах єдиного циклу моделювання.

Практичне значення результатів полягає у можливості застосування розробленої моделі для проєктування та оптимізації операторських мереж 5G. Отримані залежності дають змогу обґрунтовано обирати частотні діапазони з урахуванням топографічних умов і конфігурувати SDN-політики для забезпечення гарантованого обслуговування критичних сервісів.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією механізмів машинного навчання для предиктивного керування SDN-політиками на основі динамічного прогнозування стану радіоканалу. Окремим напрямом розвитку є розширення моделі на мережі 6G, зокрема з підтримкою терагерцового діапазону та використанням інтелектуальних відбивних поверхонь (RIS).

Список літератури:

1. Сколец С. С., Кравчук С. О. Віртуалізація мережних функцій у 5G: підходи, архітектура та перспективи розвитку. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36, № 1. С. 25–35. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/23>
2. Кравчук С. О. Теорія мобільних інфокомунікаційних систем. Архітектура системи : підручник. Київ : Ігор Сікорський Київський політехнічний інститут, 2023. 683 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/2e689a6c-2852-4367-859e-c6a084b9cb20/download>
3. Lavacca F. G., Salvo P., Ferranti L., Speranza A., Costantini L. Performance Evaluation of 5G Access Technologies and SDN Transport Network on an NS3 Simulator. *Computers*. 2020. Vol. 9, № 2. P. 43. DOI: 10.3390/computers9020043.
4. Khorsandroo S., Sánchez A. G., Tosun A. S., Arco J. M., Doriguzzi-Corin R. Hybrid SDN evolution: A comprehensive survey of the state-of-the-art. *Computer Networks*. 2021. Vol. 192. 107981. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.107981.
5. Ammar S., Lau C. P., Shihada B. An In-Depth Survey on Virtualization Technologies in 6G Integrated Terrestrial and Non-Terrestrial Networks. *arXiv:2312.01895*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2312.01895>
6. Mouawad N. SDN based Mobility Management and Quality of Service Provisioning for 5G Vehicular Networks. Université Paris-Saclay; Université Libanaise. 2020. URL: <https://theses.hal.science/tel-02973961>
7. Beshley M., Beshley H., Maksymyuk T., Strykhalyuk B. End-to-End QoS “Smart Queue” Management Algorithms and Traffic Prioritization Mechanisms for Narrow-Band Internet of Things Services in 4G/5G Networks. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 8. P. 2324. DOI: 10.3390/s20082324.

8. Lin Y.-B., Tseng C.-C., Wang M.-H. Effects of Transport Network Slicing on 5G Applications. *Future Internet*. 2021. Vol. 13, № 3. P. 69. DOI: 10.3390/fi13030069.
9. Ibarra-Lancheros K. S., Puerto-Leguizamón G., Suárez-Fajardo C. A. Quality of service evaluation based on network slicing for software-defined 5G systems. *Ingeniería y Universidad*. 2018. Vol. 22, № 3. P. 27–50. URL: <https://www.redalyc.org/journal/3442/344256704002/344256704002.pdf>
10. Botez R., Pasca A.-G., Sferle A.-T., Ivanciu I.-A., Dobrota V. Efficient Network Slicing with SDN and Heuristic Algorithm for Low Latency Services in 5G/B5G Networks. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 13. P. 6053. DOI: 10.3390/s23136053.
11. Abood M. S., Wang H., Virdee B. S., et al. Improved 5G network slicing for enhanced QoS against attack in SDN environment using deep learning. *IET Communications*. 2024. Vol. 18, № 1. P. 38–52. DOI: 10.1049/cmu2.12735.
12. Coêlho R. W., Silva R. A., Leonardo E. J., Martimiano L. A. F. IoT and 5G Networks: A Discussion of SDN, NFV and Information Security. *Journal of the Brazilian Computer Society*. 2024. Vol. 30, № 1. P. 1–15. DOI: 10.5753/jbcs.2024.3021.

Skolets S.S., Kravchuk S.O. COMPREHENSIVE E2E QOS ASSESSMENT METHOD VIA INTEGRATED RAN AND SDN-TRANSPORT MODELING IN 5G NETWORKS

The period of mass 5G technology deployment necessitates precise coordination between the radio segment and the software-defined transport infrastructure. This paper presents a method for comprehensive end-to-end quality of service (E2E QoS) assessment, based on the interrelation between physical radio channel parameters and SDN routing logic. The practical implementation of this approach was achieved through the integration of the ns-3 simulator, responsible for RAN modelling, and the Mininet emulator, which reproduces the functionality of the software-defined transport network. The proposed toolkit enabled the determination of relevant throughput, latency, and jitter metrics across various frequency bands and signal propagation scenarios. Special emphasis is placed on high-load regimes, where operators face the necessity of implementing prioritization for critical data flows. Under these conditions, the method provides an objective evaluation of the effectiveness of adaptive SDN policies compared to conventional routing algorithms. The optimal performance of a 5G network in such circumstances directly depends on the rational selection of the frequency spectrum and service queue configurations, requiring the simultaneous resolution of radio interface modelling, environment integration, and multi-factor QoS metric analysis. To verify the impact of RAN parameters on the resulting service quality, spectral efficiency and connection stability were evaluated under Non-Line-of-Sight (NLoS) conditions. E2E QoS operational performance indicators were determined over a 60-second simulation interval, accounting for dynamic changes in modulation schemes (from QPSK to 256-QAM) and the variability of different traffic types. The efficiency analysis of the transport segment is based on a comparison between Shortest Path and QoS-based strategies. This approach considers that when link utilization exceeds 75%, critical URLLC traffic requires isolated service queues to minimize latency. The final element of the study is a developed method for evaluating the probabilistic performance indicators of the integrated system, which allows for the detailing of multiple end-to-end delay components within the «user-to-service» path.

Keywords: end-to-end modelling, efficiency, Quality of Service (QoS), Software-Defined Networking (SDN), Radio Access Network (RAN), 4G/5G networks, ns-3 and Mininet integration.

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Судаков Є.В.

<https://orcid.org/0009-0008-7617-5719>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Сокол Г.В.

<https://orcid.org/0000-0003-4847-518X>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ СЕРЕДНЬОЇ ЗАТРИМКИ ПАКЕТІВ У МЕРЕЖАХ З МІМО-ТЕХНОЛОГІЄЮ ТА ВИПАДКОВИМ ДОСТУПОМ

У статті розглянуто проблему оцінювання середньої затримки пакетів у бездротових телекомунікаційних мережах із використанням технології МІМО та випадкового доступу до середовища. Актуальність дослідження зумовлена зростаючими вимогами до якості обслуговування (QoS) у сучасних мережах, зокрема в умовах високої динаміки радіоканалу та стохастичного характеру трафіку. Метою роботи є розробка математичної моделі, яка дозволяє адекватно оцінювати середню затримку пакетів із урахуванням параметрів МІМО-каналу та змінної пропускної здатності.

Запропоновано підхід на основі моделі масового обслуговування типу $M/G/1$, у якій час обслуговування визначається як випадкова величина, що залежить від миттєвої ємності каналу. Пропускна здатність моделюється через матричне представлення МІМО-каналу з урахуванням випадкового згасання, зокрема для випадку Rayleigh fading. Отримано аналітичні оцінки середнього та другого моментів часу обслуговування, що дозволяє застосувати формулу Поллачака–Кхінчина для визначення середньої затримки. Особливістю підходу є інтеграція фізичного рівня (характеристик каналу) з мережевим рівнем (процесами черг), що забезпечує більш реалістичне моделювання.

Проведено чисельне моделювання для різних конфігурацій МІМО-систем (2×2 , 4×4 , 8×8), яке підтвердило адекватність запропонованої моделі. Показано, що збільшення кількості антен призводить до суттєвого зниження середньої затримки за рахунок зростання пропускної здатності. Встановлено, що при наближенні інтенсивності трафіку до межі стійкості системи затримка різко зростає, що узгоджується з теоретичними властивостями систем $M/G/1$. Також доведено значний вплив дисперсії пропускної здатності на величину затримки.

Отримані результати можуть бути використані для розробки адаптивних алгоритмів керування доступом до середовища, оптимізації розподілу радіоресурсів та підвищення ефективності функціонування бездротових мереж наступного покоління.

Ключові слова: МІМО, бездротові мережі, якість обслуговування, теорія масового обслуговування, пропускна здатність каналу, середня затримка пакетів, стохастичні процеси, черги пакетів, інтенсивність трафіку, багатоканальні системи.

Постановка проблеми. Сучасні бездротові телекомунікаційні мережі функціонують в умовах постійного зростання обсягів переданих даних, високої динамічності трафіку та жорстких вимог до якості обслуговування (QoS), особливо щодо затримок пакетів. Широке впровадження технологій МІМО у системах 4G/5G та перспективних мережах наступного покоління дозволяє значно підвищити пропускну здатність і спектральну

ефективність, однак водночас ускладнює процес аналізу часових характеристик обслуговування через залежність швидкості передачі від стану радіоканалу.

Однією з ключових проблем є адекватне оцінювання середньої затримки пакетів у мережах із випадковим доступом, де надходження трафіку має стохастичний характер, а обслуговування визначається змінною пропускну здатністю

каналу. У таких умовах класичні моделі теорії масового обслуговування, що припускають сталі або незалежні від фізичного рівня характеристики обслуговування, не забезпечують достатньої точності, оскільки не враховують вплив параметрів МІМО-каналу (кількості антен, рівня шуму, статистики згасання) на час обробки пакетів.

Крім того, існуючі підходи до аналізу затримок або базуються на надмірно спрощених припущеннях, або характеризуються високою обчислювальною складністю, що обмежує їх практичне застосування в реальних мережах. Недостатньо дослідженим залишається питання інтеграції характеристик фізичного рівня (зокрема, матричної структури МІМО-каналу) з моделями черг для отримання узагальненої оцінки затримок.

Таким чином, виникає необхідність розробки математичної моделі, яка б дозволяла враховувати стохастичну природу трафіку, змінність радіоканалу та параметри МІМО-системи при оцінюванні середньої затримки пакетів, забезпечуючи при цьому достатню точність і придатність до практичного використання в задачах аналізу та оптимізації телекомунікаційних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінювання середньої затримки в мережах із технологіями МІМО та випадковим доступом є актуальною задачею через підвищені вимоги до QoS і динамічність радіоканалу. Сучасні підходи базуються на моделях, що враховують стохастичний характер трафіку та змінну пропускну здатність.

Дослідження впливу черг і параметрів зв'язку на продуктивність МІМО-систем показало важливість урахування взаємодії процесів обслуговування, однак відповідні моделі часто обмежені окремими сценаріями [1]. Використання методів аналізу великих відхилень для багатокористувацьких систем дозволяє підвищити точність оцінювання затримок, але значно ускладнює практичну реалізацію [2]. Підходи до вдосконалення випадкового доступу із застосуванням масивного МІМО забезпечують підвищення ефективності доступу, хоча потребують точного налаштування параметрів системи [3]. Аналіз продуктивності МІМО у МЕС-мережах демонструє потенціал високої ефективності, проте має переважно теоретичний характер [4].

Запропоновані методи організації випадкового доступу для масивного МІМО дозволяють ефективно обслуговувати значну кількість пристроїв, але вимагають складних механізмів координації [5]. Узагальнені моделі планування ресурсів характеризуються високою точністю, проте супроводжуються значною обчислювальною складністю

[6]. Застосування статистичних обмежень у моделях черг забезпечує більш реалістичну оцінку затримок, хоча обмежується певними типами трафіку [7]. Методи, що враховують обмеження на затримку та керування ресурсами, демонструють ефективність, але складні для практичної реалізації [8]. Оптимізація планування та керування потужністю підвищує ефективність використання ресурсів, однак потребує точного прогнозування трафіку [9]. Детальний аналіз затримок у МІМО-системах дозволяє врахувати вплив параметрів мережі, хоча такі підходи часто не мають експериментального підтвердження [10].

Таким чином, існуючі підходи або спрощують модель, або є складними для реалізації, що обумовлює необхідність розробки більш універсальних і практично орієнтованих методів оцінювання затримок.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка та формалізація моделі оцінювання середньої затримки пакетів у системі типу $M/G/1$, у якій час обслуговування визначається через пропускну здатність МІМО-каналу. Для цього необхідно:

- описати пропускну здатність каналу як функцію матриці $H(t)$ та параметрів системи;
- визначити статистичні характеристики часу обслуговування пакетів (математичне сподівання та другий момент);
- отримати аналітичний вираз для середньої затримки з використанням формули Поллачака–Кхінчина;
- дослідити вплив параметрів МІМО (кількості антен, рівня шуму, інтенсивності трафіку) на величину затримки.

Розв'язання поставленої задачі дозволить отримати узагальнений інструмент для аналізу та прогнозування часових характеристик у бездротових мережах із МІМО та випадковим доступом, що є важливим для оптимізації QoS.

Виклад основного матеріалу.

Формалізація моделі.

Для оцінювання середньої затримки пакетів у телекомунікаційній системі з використанням технології МІМО та випадковим доступом запропоновано використання моделі масового обслуговування типу $M/G/1$. У цій моделі припускається, що пакети надходять у систему згідно з пуассонівським потоком з інтенсивністю λ , а час обслуговування є випадковою величиною із загальним розподілом, який визначається динамічними характеристиками МІМО-каналу.

Смність каналу в момент часу t визначається як:

$$C(t) = \log_2 \det \left(I_N + \frac{P}{N_t N_0} H(t) H^H(t) \right), \quad (1)$$

де $H(t)$ – матриця каналу розміром $N_r \times N_t$, елементи якої є комплексно-гаусівськими випадковими величинами; P – потужність передавача; N_0 – спектральна щільність шуму; $H^H(t)$ – ермітове спряження до $H(t)$; I – одинична матриця відповідного розміру.

Пропускна здатність каналу впливає на час обслуговування одного пакету, що визначається як відношення середнього розміру пакету L (у бітах) до миттєвої пропускної здатності $C(t)$. Таким чином, випадкова величина часу обслуговування має вигляд:

$$S(t) = \frac{L}{C(t)}. \quad (2)$$

Оскільки час обслуговування має загальний розподіл, система описується моделлю $M/G/1$. Для такої системи середня затримка D оцінюється за формулою Поллачака-Кхінчина:

$$D = \frac{\lambda E[S^2]}{2 \cdot (1 - \rho)} + E[S], \quad (3)$$

де $E[S]$ – математичне сподівання часу обслуговування; $E[S^2]$ – друга моментна характеристика часу обслуговування; $\rho = \lambda \cdot E[S]$ – коефіцієнт завантаження системи. Ця формула дозволяє врахувати вплив статистики каналного процесу на середню затримку в черзі.

Враховуючи стохастичну природу каналу, оцінювання $E[S]$ та $E[S^2]$ здійснюється шляхом чисельного моделювання на основі генерації випадкових матриць $H(t)$, з подальшим обчисленням відповідних характеристик часу обслуговування.

Аналітичне оцінювання часу обслуговування в МІМО-каналі.

У контексті розробленої моделі середня затримка значною мірою визначається характеристиками часу обслуговування, який, у свою чергу, залежить від пропускної здатності МІМО-каналу. Для здійснення аналітичної оцінки середнього та другого моменту часу обслуговування необхідно врахувати статистичні властивості матриці каналу $H(t)$.

У випадку Rayleigh fading, коли всі елементи $H(t)$ є незалежними комплексно-нормальними випадковими величинами з нульовим середнім та одиничною дисперсією, матриця $W = H(t)H^H(t)$ має розподіл Вішарта. У такому випадку пропускна здатність $C(t)$ є випадковою величиною, функцією власних значень цієї матриці.

Середню пропускну здатність можна апроксимувати згідно з наступною формулою:

$$\bar{C} = E \left[\log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{P}{N_t N_0} H(t) H^H(t) \right) \right], \quad (4)$$

що, при використанні спектрального розкладу, може бути записано як:

$$\bar{C} = E \left[\sum_{i=1}^r \log_2 (1 + \gamma \lambda_i) \right], \quad (5)$$

де $\gamma = \frac{P}{N_t N_0}$ – відношення сигнал/шум на вхід антен, λ_i – власні значення матриці W , $r = \min(N_t, N_r)$.

З огляду на складність знаходження точного виразу для $E[C^{-1}]$, середній час обслуговування можна оцінити через обернення середньої пропускної здатності:

$$E[S] \approx \frac{L}{\bar{C}}. \quad (6)$$

Для знаходження другого моменту часу обслуговування $E[S^2]$ можна скористатись наступною апроксимацією:

$$E[S^2] \approx \frac{L^2 \cdot \text{Var}[C]}{\bar{C}^4} + \left(\frac{L}{\bar{C}} \right)^2, \quad (7)$$

де $\text{Var}[C] = E[C^2] - (\bar{C})^2$ – дисперсія пропускної здатності, яка також може бути оцінена чисельно через моделювання розподілу λ_i .

Отримавши значення $E[S]$ та $E[S^2]$, можна перейти до остаточного розрахунку середньої затримки за допомогою формули Поллачака-Кхінчина:

$$\bar{D} = \frac{\lambda \cdot E[S^2]}{2 \cdot (1 - \lambda \cdot E[S])} + E[S], \quad (8)$$

Такий підхід дозволяє зручно варіювати кількість антен, рівень шуму, середній розмір пакету та інші параметри системи для аналізу впливу на середню затримку.

Результати чисельного моделювання.

З метою підтвердження адекватності розробленої моделі було проведено чисельне моделювання середньої затримки в залежності від інтенсивності вхідного трафіку λ для трьох типових конфігурацій МІМО-систем: 2×2 , 4×4 та 8×8 . Значення середньої пропускної здатності $\bar{C}$ для кожної конфігурації були вибрані на основі відомих характеристик МІМО-каналів при Rayleigh fading і відношенні сигнал/шум $\gamma = 10$ дБ:

$$\bar{C}_{2 \times 2} \approx 6,0 \text{ бім} / \text{с} / \text{Гц};$$

$$\bar{C}_{4 \times 4} \approx 11,0 \text{ бім} / \text{с} / \text{Гц};$$

$$\bar{C}_{8 \times 8} \approx 18,0 \text{ бім} / \text{с} / \text{Гц}.$$

Оскільки середня швидкість обслуговування $\mu = \bar{C} / L$ є обернено пропорційною до розміру пакета L , для підтримання умов стійкості системи $\lambda < \mu$ було обмежено інтервалом від 0,0005 до 0,0055 пакетів/такт (рис. 1).

На графіку (рис. 1) представлено залежність середньої затримки від інтенсивності трафіку для кожної конфігурації МІМО. Можна зробити наступні спостереження:

По-перше, затримки зменшуються зі збільшенням кількості антен. Так, у конфігурації 8×8 забезпечуються найнижчі значення затримки серед усіх варіантів. Це зумовлено вищою середньою пропускну здатністю каналу, яка дозволяє обробляти пакети швидше навіть за умов високої інтенсивності трафіку.

По-друге, затримки швидко зростають при наближенні до межі стійкості. Для всіх конфігурацій помітне різке зростання затримки при $\lambda \rightarrow \mu$, що відповідає теоретичним уявленням про поведінку $M/G/1$ систем – затримка асимптотично прямує до нескінченності при завантаженні, що наближається до одиниці.

По-третє, значний вплив оказує дисперсія пропускну здатності. Навіть при однаковому середньому значенні $\bar{C}$, більша варіативність каналу (що не моделювалась у спрощеному вигляді, але може бути врахована в майбутніх дослідженнях) приведе до збільшення другого моменту часу обслуговування $E[S^2]$, що додатково підвищить затримку.

Запропонований підхід є новим у тому сенсі, що дозволяє формалізувати оцінку середньої затримки для систем з адаптивною пропускну здатністю на основі МІМО-каналу. На відміну від класичних моделей, де швидкість обслуговування вважається сталою або випадковою незалежно від фізичного каналу, у запропонованій моделі вона

прямо пов'язана зі статистичними властивостями матриці $H(t)$.

Запропонований підхід дозволяє моделювати реалістичну поведінку бездротових систем, у яких параметри каналу змінюються в часі та безпосередньо впливають на якість обслуговування (QoS). Такий підхід забезпечує більш точне відображення впливу фізичних умов передачі на роботу вищих рівнів мережевого стека.

Окрім того, розроблена модель дозволяє розширити класичну теорію черг типу $M/G/1$, включивши до неї випадки, коли сервісна характеристика залежить не від заздалегідь заданого розподілу, а формується на основі змінної пропускну здатності, що зумовлена станом каналу. Це значно наближає теоретичні моделі до практичних умов експлуатації сучасних телекомунікаційних систем.

Важливою перевагою також є можливість використання отриманих результатів для розробки і вдосконалення протоколів управління доступом до середовища (MAC-рівень), зокрема в адаптивних схемах. Це особливо актуально для динамічних середовищ, таких як мобільні або сенсорні мережі, де швидкі зміни топології або умов каналу вимагають гнучкого та інформованого управління ресурсами.

Таким чином, результати проведеного моделювання не лише підтверджують коректність теоретичних оцінок, а й формують надійну наукову основу для подальших досліджень у напрямі аналізу та оптимізації продуктивності багатоканальних бездротових систем з випадковим доступом.

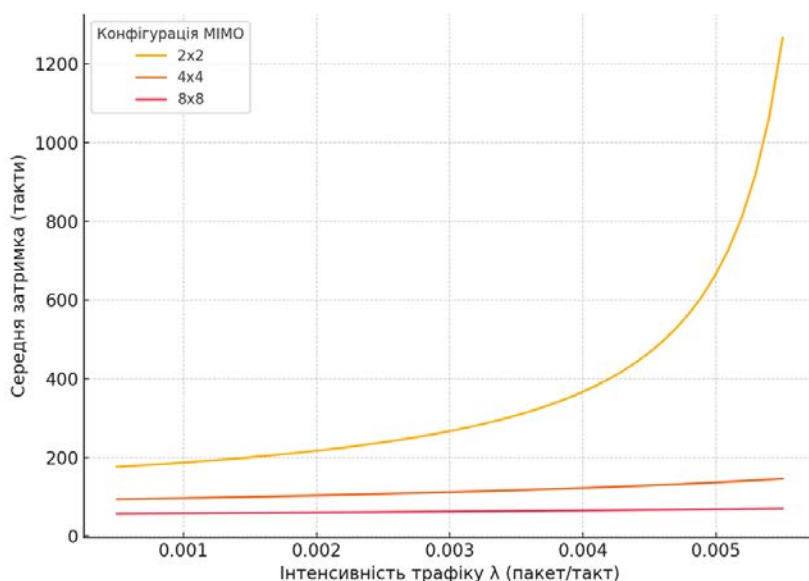


Рис. 1. Залежність середньої затримки від інтенсивності трафіку λ

Висновки. Проведене дослідження дозволяє зробити низку важливих висновків, які підтверджують наукову доцільність та практичну значущість розробленої математичної моделі. Запропонований підхід до оцінювання середньої затримки в системах з технологією МІМО та випадковим доступом є ефективним інструментом аналізу продуктивності сучасних телекомунікаційних мереж. Основна цінність моделі полягає в тому, що вона поєднує класичний апарат теорії черг із реальною фізичною природою каналу, зокрема залежністю сервісної характеристики від миттєвої пропускної здатності, що формується на основі параметрів МІМО-каналу.

Результати чисельного моделювання узгоджуються з аналітичними оцінками і підтверджують, що збільшення кількості антен у системі істотно знижує середню затримку при збереженні тих

самих умов трафіку. Також продемонстровано, що поведінка затримки поблизу граничного навантаження має експоненційний характер, характерний для $M/G/1$ систем. Водночас виявлено, що дисперсія часу обслуговування істотно впливає на рівень затримки, навіть при незмінному середньому значенні пропускної здатності, що слід враховувати при проектуванні адаптивних систем доступу.

Отримані висновки можуть слугувати основою для подальших досліджень, зокрема у напрямі побудови адаптивних протоколів МАС-рівня, що враховують динаміку пропускної здатності та статистичні параметри каналу. Крім того, модель може бути використана для розробки алгоритмів керування навантаженням, планування радіоресурсів і оптимізації параметрів бездротових мереж наступного покоління.

Список літератури:

1. Jiang H., Qu D., Ding J., Jiang T. Grant-Free Random Access Enhanced by Massive MIMO with Non-Orthogonal Preambles. *Electronics*. 2024. Vol. 13, No. 11. P. 2179. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13112179>
2. Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D. The speed calculating increasing method of the markov model network node. *Advanced Information Systems*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02>
3. Jiang H., Qu D., Ding J., Jiang T. Multiple Preambles for High Success Rate of Grant-Free Random Access with Massive MIMO. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2019. Vol. 18, No. 10. P. 4776–4788. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.07535>
4. Сокол Г.В., Ковда Є.О. Метод виявлення несанкціонованих вузлів на МАС-рівні. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 4. С. 91-98. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/12>
5. Callebaut G., Van der Perre L., Rottenberg F. Grant-Free Random Access in Massive MIMO for Static Low-Power IoT Nodes. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 21. P. 7110. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.07927>
6. Воронець В.М., Пустовойтов П.Є. Метод формування плану передачі пакетів при піковому навантаженні мережі, який знижує відгук. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. Т. 1 (75). С. 185-188. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.185>
7. Pustovoitov P., Voronets V., Voronets O., Sokol H., Okhrymenko M. Assessment of QOS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, no. 4 (127). P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>
8. Воронець О.М., Воронець В.М., Трубочанінова К.А. Метод адаптивної маршрутизації в умовах змінного навантаження сенсорної мережі. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 37(76), № 6. С. 58-65. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/09>
9. Воронець О., Воронець В., Пустовойтов П. Фрактальний підхід до прогнозування критичних станів вузлів мережі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2025. № 4(26). С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.04.03>
10. Xu Du, Yin Sun, Ness B. Shroff, Ashutosh Sabharwal. Balancing Queueing and Retransmission: Latency-Optimal Massive MIMO Design. *IEEE Transactions on Wireless Communication*. 2020. Vol. 19, No. 4. P. 2293–2307. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2963830>

Sudakov Ye.V., Sokol H.V. METHOD FOR ESTIMATING AVERAGE PACKET DELAY IN NETWORKS WITH MIMO TECHNOLOGY AND RANDOM ACCESS

The article considers the problem of estimating the average packet delay in wireless telecommunication networks using MIMO technology and random access to the medium. The relevance of the study is due to the increasing requirements for quality of service (QoS) in modern networks, in particular in conditions of high radio channel dynamics and stochastic nature of traffic. The aim of the work is to develop a mathematical

model that allows for adequate estimation of the average packet delay taking into account the parameters of the MIMO channel and variable bandwidth.

An approach based on the M/G/1 type queuing model is proposed, in which the service time is defined as a random variable that depends on the instantaneous channel capacity. The throughput is modeled through a matrix representation of the MIMO channel taking into account random fading, in particular for the case of Rayleigh fading. Analytical estimates of the average and second service time moments are obtained, which allows the Pollachak–Khinchin formula to be applied to determine the average delay. A feature of the approach is the integration of the physical layer (channel characteristics) with the network layer (queue processes), which provides more realistic modeling.

Numerical modeling was performed for various configurations of MIMO systems (2×2 , 4×4 , 8×8), which confirmed the adequacy of the proposed model. It is shown that an increase in the number of antennas leads to a significant decrease in the average delay due to an increase in throughput. It is established that when the traffic intensity approaches the system stability limit, the delay increases sharply, which is consistent with the theoretical properties of M/G/1 systems. A significant influence of the throughput dispersion on the delay value is also proven.

The results obtained can be used to develop adaptive algorithms for controlling access to the environment, optimizing the allocation of radio resources, and improving the efficiency of next-generation wireless networks.

Keywords: MIMO, wireless networks, quality of service, queuing theory, channel capacity, average packet delay, stochastic processes, packet queues, traffic intensity, multi-channel systems.

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.039:621.311.24:621.548

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/18>

Алфімов Є.Б.

<https://orcid.org/0009-0003-2832-041X>

Інститут проблем математичних машин і систем
Національної академії наук України

ОПЕРАТИВНЕ МАНЕВРУВАННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ У ДОБОВОМУ БАЛАНСУВАННІ НА ФОНІ СОНЯЧНО-ВІТРОВОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

Актуальність дослідження зумовлена зростанням частки сонячної та вітрової генерації у структурі електроенергетичних систем, що супроводжується підвищенням нерівномірності виробництва електроенергії та ускладненням підтримання балансу між генерацією й споживанням. У цих умовах особливого значення набуває пошук технологічних рішень, здатних забезпечувати стабільність роботи енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії (далі – ВДЕ). Одним із перспективних напрямів вважається використання малих модульних реакторів (далі – ММР) як елементу гнучкої низьковуглецевої генерації, здатної брати участь у процесах балансування потужності. Метою статті є обґрунтування можливості використання ММР для оперативного регулювання потужності та участі в добовому балансуванні електроенергетичних систем в умовах зростання частки сонячної та вітрової генерації. У процесі дослідження використано методи наукового узагальнення, порівняльного та системного аналізу, а також елементи енергетичного моделювання режимів роботи енергосистем. Досліджено сучасні підходи до інтеграції ММР у структуру електроенергетичних систем, проаналізовано техніко-експлуатаційні особливості зміни їхньої потужності та оцінено можливості використання реакторних установок у режимах добового балансування енергосистеми. Визначено особливості інтеграції ММР у системи з високою часткою ВДЕ. Встановлено, що модульна структура реакторних установок, можливість регулювання потужності та застосування цифрових систем керування створюють передумови для використання таких реакторів у режимах оперативного маневрування. Доведено, що застосування ММР сприяє згладжуванню добових коливань сумарної генерації, компенсації зниження виробництва електроенергії сонячними та вітровими електростанціями та підвищенню стабільності функціонування енергосистеми. У висновках обґрунтовано доцільність використання ММР як елементу гнучкої низьковуглецевої генерації для балансування електроенергетичних систем із високою часткою ВДЕ. Встановлено, що поєднання стабільної атомної генерації зі змінною генерацією сонячних і вітрових електростанцій дозволяє підвищити надійність та передбачуваність режимів роботи енергосистем.

Ключові слова: енергосистема, регулювання навантаження, гнучкість генерації, гібридні енергетичні системи, стабільність енергопостачання, інтеграція відновлюваних джерел енергії, низьковуглецева енергетика.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку енергетики суттєво зростає частка ВДЕ, зокрема сонячної та вітрової генерації, виробництво електроенергії з яких характеризується значною добовою й сезонною нерівномірністю. Коливання потужності таких джерел створюють додаткові вимоги до гнучкості енергосистеми та ускладнюють підтримання балансу між виробни-

цтвом і споживанням електроенергії. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває пошук технологічних рішень, здатних забезпечити стабільність роботи енергосистеми в умовах зростання частки нестабільної генерації.

Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є використання ММР, конструктивні особливості яких передбачають підвищену



гнучкість режимів експлуатації порівняно з традиційними атомними енергоблоками. Завдяки можливості оперативної зміни рівня потужності такі реактори можуть брати участь у процесах добового балансування енергосистеми, компенсуючи коливання виробництва електроенергії сонячними та вітровими електростанціями. Водночас упровадження маневрових режимів роботи атомної генерації потребує комплексного наукового обґрунтування з урахуванням технічних, експлуатаційних і системних аспектів. З огляду на це, дослідження можливостей оперативного маневрування ММР у системі добового балансування електроенергетики має важливе наукове та практичне значення для підвищення надійності та гнучкості сучасних енергосистем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сучасних досліджень дозволяє виокремити кілька взаємопов'язаних наукових підходів, що відображають еволюцію уявлень про роль ММР у системах із високою часткою змінної відновлюваної генерації. Значна частина досліджень зосереджена на системних питаннях інтеграції ММР у структуру енергосистем та визначенні їхньої ролі в стабілізації енергетичного балансу. Зокрема, Є. Алфімов обґрунтовує можливості інтеграції ММР у динамічні енергосистеми з високою часткою ВДЕ, зокрема сонячної й вітрової генерації, із застосуванням механізмів керування навантаженням та адаптації режимів роботи реакторів до змінної структури попиту й генерації електроенергії [1]. Оцінку економічних параметрів реакторних установок, перспективних для будівництва в Україні, здійснюють О. Дибач та співавтори, доводячи, що ММР можуть бути стабілізаційним елементом гібридних енергетичних систем, здатним компенсувати нестабільність генерації ВДЕ [2]. Розвиток децентралізованої енергетики та роль керованих джерел енергії в забезпеченні надійності енергопостачання аналізують А. Халатов та Н. Фіалко, підкреслюючи важливість поєднання різних типів генерації для підвищення гнучкості енергосистем [3]. Системи розподіленої генерації як основу формування децентралізованої енергетичної архітектури, у якій ММР можуть бути стабілізаційним джерелом керованої потужності поряд із ВДЕ, розглядають О. Винаков та О. Кетрарь [4].

Важливий пласт досліджень стосується інтеграції ММР у гібридні мікромережі та системи керування енергетичними потоками. Так, Д. Майклсон (D. Michaelson) та Дж. Цзян (J. Jiang) у своїй роботі здійснюють огляд інтеграції ММР у мікро-

мережі з ВДЕ, доводячи, що ММР можуть виконувати функцію стабілізаційного джерела базової потужності, яке згладжує коливання виробництва електроенергії сонячними та вітровими установками [5]. Багаторівневу модель оптимізації спільної роботи фотоелектричної генерації та ММР у гібридних мікромережах, що дозволяє підвищити ефективність балансування електроенергетичних систем за умов нестабільної генерації, пропонують Ю. Дуань та співавтори (Y. Duan et al.) [6]. Можливості моделювання роботи ММР у режимі реального часу у складі гібридних систем nuclear-renewable, що дозволяє аналізувати динамічну поведінку реактора під час змін генерації відновлюваних джерел, демонструють Г. Габбар (H. Gabbar) та О. Естевес (O. Esteves) [7]. Підходи до управління енергетичними потоками в автономних мікромережах із використанням ММР та ВДЕ досліджують у подальшій роботі Д. Майклсон (D. Michaelson) та Дж. Цзян (J. Jiang), підкреслюючи значення прогнозування навантаження й виробництва електроенергії для забезпечення стабільної роботи системи [8].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із визначенням ролі ММР у процесі глобального енергетичного переходу та формуванні низьковуглецевих енергетичних систем. Зокрема Е. Майкелідіс (E. Michaelides) та Д. Майкелідіс (D. Michaelides) аналізують перспективи використання ММР у системах із високою часткою відновлюваної енергетики та доводять, що вони можуть забезпечувати стабільність енергосистем у разі значних коливань виробництва електроенергії [9]. Перспективи застосування ММР у морському секторі досліджують С. Сенеммар та співавтори (S. Senemmar et al.), підкреслюючи їхню здатність забезпечувати стабільне енергопостачання в системах із високою варіативністю попиту [10]. Конструктивні та експлуатаційні обмеження ММР при їх інтеграції з фотоелектричною генерацією в локальних енергетичних системах досліджує колектив авторів на чолі із К. Йоші (K. Joshi et al.), наголошуючи на необхідності врахування теплогідравлічних характеристик реактора під час реалізації режимів маневрування [11].

Водночас значна частина наукових робіт присвячена дослідженню технічних параметрів гнучкої експлуатації ММР і розвитку гібридних енергетичних систем. Так, С. Чанг (C. Chang) та Г. Ояндо (H. Oyando) здійснюють систематичний огляд вимог до режимів слідкування за навантаженням ММР, визначаючи технічні параметри, що забезпечують їх гнучку експлуатацію

в змінних енергосистемах [12]. Гібридну енергетичну систему на основі ММР для виробництва електроенергії та теплопостачання досліджують Б. Пудел (B. Poudel) та Р. Гокараджу (R. Gokaraju), демонструючи можливості поєднання електричної й теплової генерації для підвищення гнучкості використання енергетичних ресурсів [13].

Попри активне дослідження проблем інтеграції ММР у сучасні енергосистеми, низка аспектів залишається недостатньо вивченою. Зокрема, обмежено досліджені техніко-експлуатаційні можливості маневрування потужністю ММР у режимах добового балансування енергосистем із високою часткою сонячної та вітрової генерації, а також питання узгодження таких режимів із вимогами ядерної безпеки й диспетчерського керування енергосистемою. Крім того, фрагментарно вивчено роль ММР у компенсації коливань генерації ВДЕ в умовах формування гібридних енергетичних систем.

Запропоноване дослідження спрямоване на усунення зазначених прогалин шляхом аналізу наукових підходів до інтеграції ММР в енергосистеми з високою часткою ВДЕ, дослідження техніко-експлуатаційних особливостей зміни їх потужності та оцінювання ролі ММР у компенсації коливань генерації сонячних і вітрових електростанцій. Також визначено науково-практичні проблеми маневрування реакторних установок і запропоновано рекомендації щодо їх використання для підвищення стабільності та надійності енергосистем.

Постановка завдання. Метою статті є обґрунтування можливості використання ММР для оперативного маневрування потужністю в процесі добового балансування енергосистеми в умовах зростання частки сонячної та вітрової генерації.

Завдання дослідження:

1) проаналізувати наукові підходи до інтеграції ММР в енергосистеми з високою часткою ВДЕ та дослідити особливості зміни їхньої потужності в режимах добового балансування;

2) оцінити роль ММР у компенсації коливань генерації сонячних і вітрових електростанцій та виявити проблеми безпечного й ефективного маневрування реакторних установок;

3) розробити рекомендації щодо застосування ММР у режимах оперативного маневрування для підвищення стабільності та надійності енергосистем.

Виклад основного матеріалу. У сучасних наукових дослідженнях інтеграція ММР розглядається як один з основних напрямів формування гнучких низьковуглецевих енергосистем.

Зростання частки сонячної й вітрової генерації, виробництво яких має виражену нерівномірність, потребує джерел енергії, здатних забезпечувати стабільність та балансування електроенергетичної системи. Завдяки модульній конструкції, відносно невеликій встановленій потужності та можливості регулювання режимів роботи ММР можуть інтегруватися у структуру енергосистем як стабілізаційний компонент генерації. У науковій літературі сформувалося кілька підходів до їх використання в системах із високою часткою ВДЕ. Основні з них узагальнено в таблиці 1.

Реалізація наведених підходів підтверджується сучасними дослідженнями міжнародних організацій та аналітичних центрів у сфері енергетики. У технічних оглядах Міжнародного агентства з атомної енергії зазначається, що ММР можуть інтегруватися в гібридні енергетичні системи разом із сонячними й вітровими електростанціями, забезпечуючи стабільну генерацію та підтримуючи баланс електроенергії в періоди різких коливань виробництва ВДЕ [14]. Зокрема, у рамках концепції гібридних енергетичних систем із поєднанням ядерної та відновлюваної енергетики передбачається використання атомних установок для базового виробництва електроенергії з можливістю часткового регулювання потужності, тоді як змінна частина навантаження компенсується сонячною та вітровою генерацією [15].

Аналітичні дослідження національних лабораторій також демонструють перспективність такого підходу. Зокрема, у моделях енергосистем, розроблених Національною лабораторією відновлюваної енергетики США (National Renewable Energy Laboratory, NREL), показано, що поєднання атомної й відновлюваної генерації дозволяє підвищити гнучкість енергосистеми та зменшити потребу в резервних потужностях на основі вичерпного палива [16]. У сценаріях енергетичного розвитку США до середини XXI століття атомна генерація, зокрема ММР, розглядається як важливий стабілізаційний компонент систем із високою часткою змінної відновлюваної генерації. Подібні висновки містяться і в аналітичних оглядах Міжнародного енергетичного агентства, де зазначається, що атомна енергетика може відігравати важливу роль у підтриманні стабільності електроенергетичних систем із високою часткою вітрової та сонячної генерації [17].

За оцінками міжнародних дослідницьких центрів, у довгостроковій перспективі ММР розглядаються як технологія, більш адаптована до майбутніх умов функціонування енергетичних

ринків, де зростатиме потреба в гнучкості генерації, модульності енергетичних установок та їх сумісності з ВДЕ. Аналітичні матеріали OECD Nuclear Energy Agency підкреслюють, що перспективні реакторні технології, зокрема ММР, здатні ефективно працювати в системах із високою часткою змінної генерації та можуть використовуватися не лише для виробництва електроенергії, але й для виробництва тепла або водню в інтегрованих енергетичних комплексах [18].

У сучасних енергосистемах техніко-експлуатаційні характеристики ММР набувають особливого значення через потребу поєднання стабільної атомної генерації з мінливою сонячною та вітровою генерацією. На відміну від традиційних енергоблоків великої потужності ММР проєктуються з урахуванням більшої гнучкості режимів роботи, що дає підстави розглядати їх як перспективний інструмент добового балансування електроенер-

гетичної системи [2, с. 27]. Основні техніко-експлуатаційні особливості такого маневрування узагальнено в таблиці 2.

Ці техніко-експлуатаційні характеристики безпосередньо пов'язані з конструктивними параметрами реакторних установок та алгоритмами керування їхньою потужністю. У сучасних проєктах ММР передбачено можливість роботи в режимі регулювання навантаження (load-following), тобто автоматизованої зміни теплової та електричної потужності реактора відповідно до коливань попиту в енергосистемі. На відміну від традиційних енергоблоків великої потужності, для яких характерні обмежені можливості маневрування, ММР проєктуються з урахуванням ширшого діапазону регулювання потужності й швидшої реакції систем керування. За даними технічних оглядів Міжнародного агентства з атомної енергії, у низці сучасних проєктів ММР передбачено можливість

Таблиця 1

Сучасні підходи до інтеграції ММР в енергосистеми з високою часткою ВДЕ

Підхід	Основний зміст	Значення для функціонування енергосистеми
Базова низьковуглецева генерація	Використання ММР як стабільного джерела електроенергії, що забезпечує постійну генерацію незалежно від погодних умов	Підвищує надійність енергосистеми та компенсує періоди низької генерації сонячних і вітрових електростанцій
Маневрова атомна генерація	Застосування режимів регулювання потужності реакторів для компенсації коливань виробництва відновлюваної енергії	Забезпечує гнучкість енергосистеми та підтримання добового балансу електроенергії
Гібридні енергетичні комплекси	Поєднання ММР із сонячними та вітровими електростанціями в єдиній енергетичній інфраструктурі	Дозволяє оптимізувати структуру генерації й зменшити коливання сумарної потужності
Інтеграція з системами накопичення енергії	Використання акумуляторних або теплових систем зберігання енергії разом із ММР	Підвищує ефективність використання електроенергії та сприяє стабілізації режимів роботи енергосистеми
Децентралізовані енергетичні системи	Використання ММР у регіональних або локальних енергосистемах разом із ВДЕ	Сприяє розвитку розподіленої генерації та підвищує енергетичну безпеку регіонів

Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 22; 2, с. 27; 4, с. 9; 5; 8, с. 60; 9]

Таблиця 2

Техніко-експлуатаційні особливості зміни потужності ММР у процесі балансування електроенергетичної системи

Характеристика	Технічний зміст	Значення для балансування енергосистеми
Маневровість реакторної установки	Можливість регулювання теплової та електричної потужності реактора у визначених межах	Дозволяє адаптувати генерацію до добових змін попиту на електроенергію
Швидкість зміни потужності	Темп підвищення або зниження потужності реактора (rate of load following)	Забезпечує оперативну компенсацію коливань сонячної та вітрової генерації
Модульність реакторної установки	Використання кількох реакторних модулів меншої потужності на одному енергетичному майданчику	Дозволяє змінювати сумарну потужність шляхом поетапного підключення або відключення модулів
Системи автоматизованого керування	Використання цифрових систем контролю та керування реактором	Підвищує точність регулювання потужності та стабільність роботи енергосистеми
Пасивні системи безпеки	Використання природних фізичних процесів (конвекції, гравітації) для охолодження реактора	Забезпечує безпечну експлуатацію реактора в маневрових режимах роботи

Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 24; 7; 8, с. 61; 11; 12; 13, с. 2798].

зміни потужності в діапазоні приблизно 20–100 % від номінальної потужності, що дозволяє реактору адаптуватися до змін графіка навантаження енергосистеми [19].

Технічна реалізація таких режимів забезпечується поєднанням кількох інженерних рішень. По-перше, використання цифрових систем керування та автоматизованого регулювання реактивності дозволяє швидко змінювати параметри роботи реактора без порушення теплогидравлічної стабільності установки. По-друге, модульна архітектура станції передбачає розміщення кількох реакторних модулів на одному майданчику, що дає можливість змінювати сумарну потужність станції шляхом регулювання навантаження окремих модулів. Наприклад, станція з кількома реакторами потужністю 70–300 МВт кожен може працювати в різних комбінаціях навантаження, що значно спрощує адаптацію генерації до добових змін попиту на електроенергію.

Аналітичні дослідження національних лабораторій підтверджують, що саме такі технічні характеристики роблять ММР придатними для роботи в системах із високою часткою відновлюваної генерації. За сценаріями розвитку електроенергетики США, розробленими NREL, атомна генерація, зокрема ММР, розглядається як стабілізаційний компонент електроенергетичних систем зі значною часткою сонячної та вітрової генерації. У прогнозних моделях енергосистем до 2050 року передбачається збереження ролі великих атомних реакторів як базової генерації, тоді як ММР можуть використовуватися як додатковий гнучкий ресурс низьковуглецевої генерації, здатний компенсувати добові коливання виробництва електроенергії від відновлюваних джерел [20].

Зростання частки сонячної та вітрової генерації в електроенергетичних системах супроводжується значною нерівномірністю виробни-

цтва електроенергії, що ускладнює підтримання балансу між генерацією й споживанням. У цих умовах ММР розглядаються як один з інструментів компенсації змінної генерації ВДЕ [13, с. 2798]. Завдяки стабільності виробництва електроенергії та можливості регулювання потужності такі реактори можуть виконувати функції балансування енергосистеми впродовж добового циклу навантаження (табл. 3).

Роль ММР у компенсації змінної генерації ВДЕ проявляється насамперед у стабілізації добового балансу потужності енергосистеми. Для систем із високою часткою сонячної генерації характерна значна нерівномірність виробництва електроенергії: у середині дня генерація фотоелектричних станцій різко зростає, тоді як у вечірні години швидко зменшується [5]. У таких умовах атомна генерація може підтримувати стабільний базовий рівень виробництва електроенергії та компенсувати дефіцит потужності після зниження сонячної генерації. Поєднання стабільної атомної та змінної відновлюваної генерації дозволяє зменшити коливання сумарної потужності та підвищити передбачуваність режимів роботи енергосистеми. Додатковою перевагою є модульна структура таких реакторних установок, що дає змогу змінювати сумарну потужність станції шляхом регулювання навантаження окремих реакторних модулів. У періоди високої генерації відновлюваних джерел частина модулів може працювати зі зниженою потужністю, тоді як у години пікового споживання або зменшення виробництва електроенергії сонячними та вітровими електростанціями сумарна потужність станції збільшується [8, с. 61]. Таким чином, поєднання ММР із ВДЕ формує більш стабільний профіль генерації та сприяє підвищенню надійності функціонування електроенергетичної системи.

Для наочного пояснення ролі ММР у компенса-

Таблиця 3

Функціональна роль ММР у компенсації коливань генерації сонячних та вітрових електростанцій

Функція в енергосистемі	Технічний зміст	Практичне значення
Базова стабілізаційна генерація	Постійне виробництво електроенергії незалежно від погодних умов	Забезпечує стабільну частину генерації в системах із високою часткою ВДЕ
Компенсація добових коливань	Регулювання потужності реакторної установки впродовж доби	Дозволяє компенсувати зниження генерації сонячних електростанцій у вечірні години
Балансування змінної генерації	Підтримання балансу між виробництвом та споживанням електроенергії	Зменшує потребу в резервній генерації на вичерпаному паливі
Інтеграція з гібридними енергосистемами	Робота разом із сонячними, вітровими електростанціями та накопичувачами енергії	Підвищує гнучкість електроенергетичної системи
Зниження коливань сумарної генерації	Стабілізація загального обсягу виробництва електроенергії	Підвищує надійність функціонування енергосистеми

Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 25; 5; 6; 8, с. 61; 11; 13, с. 2801]

ції змінної генерації відновлюваних джерел енергії доцільно розглянути типовий добовий профіль виробництва електроенергії в енергосистемі. Значення, використані для побудови графіка, мають ілюстративний характер і відображають узагальнений режим роботи енергосистем зі значною часткою сонячної та вітрової генерації (рис. 1).

Як видно з рис. 1, у середині дня зростання сонячної генерації забезпечує значну частину виробництва електроенергії, тоді як атомна генерація підтримує стабільний базовий рівень потужності. У вечірні години, коли виробництво електроенергії фотоелектричними станціями різко зменшується, стабільна потужність ММР дозволяє компенсувати дефіцит генерації та згладити коливання сумарного виробництва електроенергії. Так, поєднання стабільної атомної генерації зі змінною генерацією відновлюваних джерел енергії сприяє формуванню більш збалансованого та передбачуваного режиму роботи електроенергетичної системи.

Зростання ролі ММР у структурі енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії актуалізує низку науково-практичних проблем, пов'язаних із забезпеченням безпечного та ефективного маневрування реакторних установок. Насамперед це стосується узгодження режимів зміни потужності реактора з вимогами ядерної та теплогідравлічної безпеки, оскільки часті цикли регулювання навантаження можуть впливати на стабільність нейтронно-фізичних параметрів активної зони, температурні режими теплоносія

та ресурс основного обладнання [4, с. 9]. Додатковими проблемами є інтеграція атомної генерації в системи диспетчерського керування енергосистемою, забезпечення синхронної роботи з відновлюваними джерелами енергії та оптимізація режимів експлуатації реакторних модулів в умовах змінного попиту на електроенергію. Важливим аспектом також залишається розроблення економічно доцільних режимів маневрування, які не знижують ефективності роботи атомної електростанції та водночас дозволяють підтримувати стабільність енергосистеми.

У цих умовах підвищення ефективності використання ММР у процесі балансування електроенергетичних систем потребує формування відповідних організаційно-технічних підходів до їх експлуатації. Доцільним є впровадження алгоритмів прогнозування генерації ВДЕ та адаптивного планування режимів роботи реакторних модулів, що дозволить завчасно коригувати рівень атомної генерації відповідно до очікуваних змін виробництва електроенергії сонячними та вітровими електростанціями. Важливим напрямом є інтеграція атомної генерації з системами накопичення енергії та іншими елементами гнучкої генерації, що дає змогу зменшити амплітуду добових коливань потужності. Крім того, ефективність маневрових режимів може бути підвищена завдяки використанню модульної структури станції, яка дозволяє регулювати сумарну потужність шляхом зміни навантаження окремих реакторних модулів. Реалізація таких підходів сприятиме формуванню більш

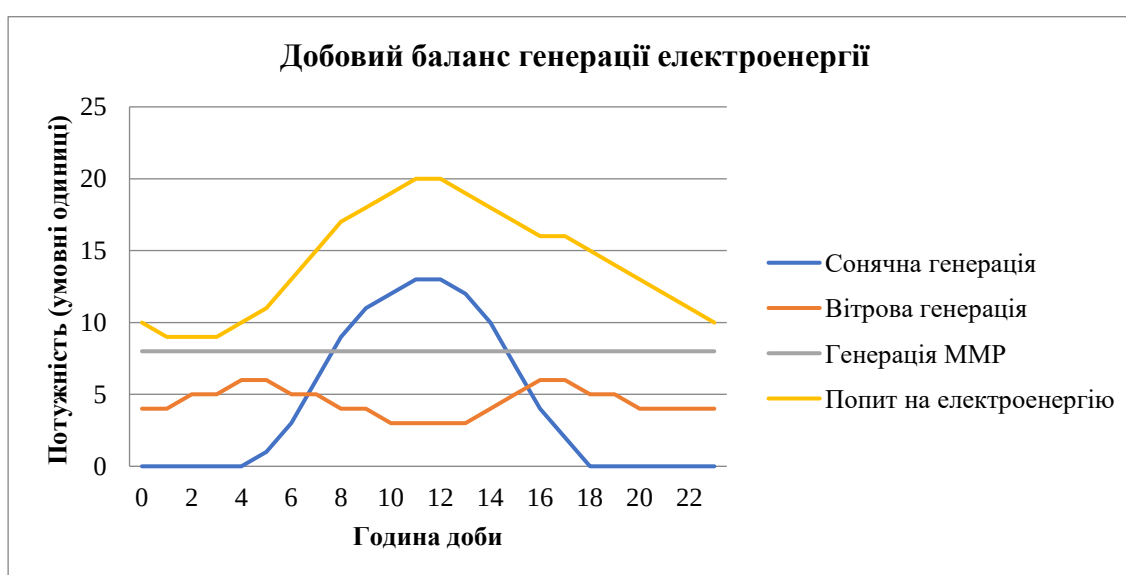


Рис. 1. Добовий баланс генерації електроенергії сонячними, вітровими електростанціями та ММР

Джерело: сформовано автором на основі [5; 6; 8, с. 58; 9; 12]

гнучких і стійких електроенергетичних систем, у яких стабільна атомна генерація поєднується зі змінною генерацією відновлюваних джерел енергії та забезпечує надійність енергопостачання.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що зростання частки сонячної й вітрової генерації у структурі електроенергетичних систем призводить до посилення нерівномірності виробництва електроенергії та ускладнює підтримання балансу між генерацією і споживанням. У цих умовах ММР можуть розглядатися як один із перспективних елементів гнучкої низьковуглецевої генерації, здатної забезпечувати стабільність функціонування енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії. Встановлено, що інтеграція ММР у структуру енергосистем може реалізовуватися через використання їх як стабілізаційного компонента базової генерації, елемента маневрової атомної генерації та частини гібридних енергетичних систем. Доведено, що техніко-експлуатаційні характеристики ММР, зокрема модульність реакторних установок, можливість регулювання потужності та застосування цифрових систем керування, створюють передумови для їх використання в режимах добового балансування електроенер-

гетичної системи. Показано, що використання ММР дозволяє згладжувати коливання сумарної генерації, компенсувати зниження виробництва електроенергії сонячними й вітровими електростанціями та зменшувати потребу в резервній генерації на викопному паливі. Водночас встановлено, що застосування ММР у режимах маневрування супроводжується низкою науково-практичних проблем, пов'язаних із забезпеченням ядерної безпеки, впливом циклічних навантажень на ресурс обладнання та необхідністю інтеграції атомної генерації в системи диспетчерського керування енергосистемою.

Обґрунтовано, що підвищення ефективності використання ММР у процесі балансування енергосистем доцільно забезпечувати шляхом адаптивного планування режимів роботи реакторних модулів, використання прогнозування генерації відновлюваних джерел енергії та інтеграції атомної генерації з системами накопичення енергії.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням моделей взаємодії ММР та відновлюваних джерел енергії в гібридних енергетичних системах та розробленням оптимальних алгоритмів маневрування атомної генерації в умовах високої частки змінної генерації.

Список літератури:

1. Алфімов Є. Інтеграція малих модульних реакторів у динамічні енергосистеми з високою часткою ВДЕ та методи керування навантаженням. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2025. Т. 1, № 3 (94). С. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.2>
2. Дибач О. та ін. Оцінка економічних показників реакторних установок, перспективних для будівництва в Україні, та їх співставлення з відновлювальними джерелами енергії із застосуванням інструментарію МАГАТЕ. Ядерна та радіаційна безпека. 2023. Вип. 3, № 99. С. 16–30. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3\(99\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3(99).02)
3. Халатов А., Фіалко Н. Газотурбінні та газопоршневі електростанції для децентралізованої енергетики України. Системні дослідження в енергетиці. 2025. Вип. 1, № 81. С. 4–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.004>
4. Винаков О. Ф., Кетрарь О. А. Пристрої та системи розподіленої генерації. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2023. Вип. 37, № 113. С. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.37.113.2023.1>
5. Michaelson D., Jiang J. Review of integration of small modular reactors in renewable energy microgrids. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 152. Article 111638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111638>
6. Duan Y., Gao C., Huang Y., Luo Q., Xu Z. Coordinated operation and multi-layered optimization of hybrid photovoltaic-small modular reactor microgrids. Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 40721. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24599-z>
7. Gabbar H. A., Esteves O. L. A. Real-time simulation of a small modular reactor in-the-loop within nuclear-renewable hybrid energy systems. Energies. 2022. Vol. 15, № 18. Article 6588. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15186588>
8. Michaelson D., Jiang J. Integration of small modular reactors into renewable energy-based standalone microgrids: An energy management perspective. IEEE Power and Energy Magazine. 2022. Vol. 20, № 2. P. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPE.2021.3134149>
9. Michaelides E. E., Michaelides D. N. Small modular reactors and the transition to renewable energy. Nuclear Engineering and Design. 2025. Vol. 441. Article 114207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114207>
10. Senemmar S., Jacob R. A., Badakhshan S., Rad A. M., Dowling M., Mukhi S., Zhang J. Navigating the future: Exploring small modular reactors in the maritime sector. IEEE Electrification Magazine. 2024. Vol. 12, № 4. P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.1109/MELE.2024.3473190>

11. Joshi K., Poudel B., Gokaraju R. Investigating small modular reactor's design limits for its flexible operation with photovoltaic generation in microcommunities. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*. 2021. Vol. 7, № 3. Article 031303. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4048896>
12. Chang C. K., Oyando H. C. Review of the requirements for load following of small modular reactors. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 17. Article 6327. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176327>
13. Poudel B., Gokaraju R. Small modular reactor (SMR) based hybrid energy system for electricity & district heating. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2021. Vol. 36, № 4. P. 2794–2802. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3079400>
14. Small Modular Reactors (SMRs). *International Atomic Energy Agency: вебсайт*. 2023. URL: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors> (дата звернення: 15.03.2026).
15. Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: Opportunities and Challenges. *International Atomic Energy Agency: вебсайт*. 2022. URL: <https://www.iaea.org/publications/15098/nuclear-renewable-hybrid-energy-systems> (дата звернення: 15.03.2026).
16. Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: Modeling and Analysis. *National Renewable Energy Laboratory: вебсайт*. 2020. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/77088.pdf> (дата звернення: 15.03.2026).
17. Nuclear Power in Clean Energy Systems. *International Energy Agency: вебсайт*. 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system> (дата звернення: 15.03.2026).
18. Advanced Nuclear Reactor Systems and Future Energy Market Needs. OECD, 2021. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/12/advanced-nuclear-reactor-systems-and-future-energy-market-needs_4f92e165/beb24009-en.pdf (дата звернення: 15.03.2026).
19. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. *International Atomic Energy Agency: вебсайт*. 2024. URL: <https://www.iaea.org/publications/15790/advances-in-small-modular-reactor-technology-developments> (дата звернення: 15.03.2026).
20. Gagnon P., Pham A., Cole W., Hamilton A. 2024 Standard Scenarios Report: A U.S. Electricity Sector Outlook. Technical Report. 2025. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy25osti/92256.pdf> (дата звернення: 15.03.2026).

Alfimov Ye.B. OPERATIONAL MANEUVERING OF SMALL MODULAR REACTOR IN DAILY BALANCING UNDER HIGH SOLAR AND WIND GENERATION

The relevance of this study stems from the growing share of solar and wind power generation in the structure of electric power systems, which is accompanied by increased variability in electricity production and greater difficulty in maintaining a balance between generation and consumption. Under these conditions, the search for technological solutions capable of ensuring the stability of power systems with a high share of renewable energy sources (hereinafter referred to as RES) takes on particular importance. One promising direction is the use of small modular reactors (hereinafter referred to as SMRs) as an element of flexible, low-carbon generation capable of participating in power balancing processes. The purpose of this article is to justify the possibility of using SMRs for operational power regulation and participation in the daily balancing of power systems amid the growing share of solar and wind generation. The research employs methods of scientific generalization, comparative and systematic analysis, and elements of energy modeling of power system operating modes. Modern scientific approaches to integrating MMR into the structure of power systems were investigated, the technical and operational characteristics of changes in their power were analyzed, and the possibilities of using reactor units in daily power system balancing modes were assessed. The specific features of integrating MMRs into systems with a high share of RES have been identified. It has been established that the modular structure of reactor units, the ability to regulate power, and the use of digital control systems create the prerequisites for using such reactors in operational maneuvering modes. It has been demonstrated that the use of MMR contributes to smoothing daily fluctuations in total generation, compensating for reductions in electricity production by solar and wind power plants, and increasing the stability of the power system's operation. The conclusions justify the feasibility of using MMR as an element of flexible low-carbon generation for balancing power systems with a high share of RES. It has been established that combining stable nuclear generation with variable generation from solar and wind power plants allows for increased reliability and predictability of power system operating modes.

Keywords: power system, load regulation, generation flexibility, hybrid energy systems, power system stability, renewable energy integration, low-carbon energy systems.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Беднарська І.С.

<https://orcid.org/0000-0002-5558-4467>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ліщук С.Р.

<https://orcid.org/0000-0001-7874-5019>

доктор філософії

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ОБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОБЛОКУ ТЕЦ У ПІСЛЯРЕМОНТНИЙ ПЕРІОД

Статтю присвячено актуальній проблемі підвищення енергоефективності та експлуатаційної надійності об'єктів генерації електричної та теплової енергії України в умовах дефіциту енергоресурсів та значного зношення основного енергетичного обладнання електростанцій. Об'єктом дослідження є процеси теплопередачі через багатошарові ізоляційні конструкції обладнання енергоблоку теплоелектроцентралі потужністю 250 МВт. Авторами проведено комплексний інструментально-розрахунковий аналіз стану теплової ізоляції котлоагрегату ТГМП-344 «А», циліндрів парової турбіни та системи паропроводів безпосередньо після завершення капітального ремонту. У роботі застосовано методику інфрачервоної термографії (із використанням тепловізора FLIR T-335) та контактної термометрії для ідентифікації зон аномального перегріву. Наукова новизна дослідження полягає у верифікації фактичних питомих теплових втрат та їх приведенні до нормативних умов згідно з технічними документами. Встановлено, що при проведенні регламентних ремонтів, на практиці спостерігається значна невідповідність фактичних показників проектним значенням. Зокрема, виявлено локальні зони на корпусах турбін з температурою 50-62 °С та критичні дефекти на трубопроводах подачі пари до живильних турбонасосів, де температура поверхні сягає 120-450 °С через руйнування ізоляційного шару. Доведено, що теплові втрати на дефектних ділянках перевищують норму на 150-300%, що призводить до перевитрат палива та порушення санітарно-гігієнічних норм праці. Авторами систематизовано причини деградації ізоляції: механічні пошкодження кожухів, просідання мінераловатних матів та відсутність ізоляції на складних геометричних вузлах. За результатами дослідження розроблено практичні рекомендації щодо впровадження сучасних базальтових та муліто-кремнеземистих матеріалів, а також знімних термочохлів для запірної арматури.

Ключові слова: тепла ізоляція, енергоефективність, ТЕЦ, теплові втрати, термографія, енергоблок, питомі витрати палива, температура, трубопроводи, циліндри турбіни, паропроводи, деградація ізоляції, енергетична безпека.

Постановка проблеми. Сучасний стан енергетичного сектору України характеризується високим ступенем зношеності основного обладнання теплових електричних станцій (ТЕС) та теплоелектроцентралей (ТЕЦ), більшість з яких перебуває в експлуатації понад 40-50 років. В умовах дефіциту енергоресурсів, стрімкого зростання вартості органічного палива та посилення екологічних вимог щодо викидів парникових газів, питання підвищення енергоефективності діючого обладнання набуває стратегічного значення для енергетичної безпеки держави.

Одним із найбільш дієвих та економічно обґрунтованих методів зниження питомих витрат

палива на відпуск енергії є мінімізація теплових втрат у навколишнє середовище через зовнішні поверхні основного та допоміжного обладнання. Теплова ізоляція енергоблоків ТЕЦ та ТЕС (турбінних установок, котлоагрегатів, паропроводів високого тиску та систем регенерації) відіграє критичну роль у забезпеченні розрахункового теплового балансу циклу.

Невідповідність стану теплової ізоляції нормативним вимогам (зокрема ГКД 34.20.507-2003) [1] призводить до низки негативних наслідків: енергетичні втрати, технологічні ризики, порушення умов охорони праці.

Енергетичні втрати полягають в перевищенні температури на поверхні ізоляції понад нормативні $+45^{\circ}\text{C}$ (при температурі повітря $+25^{\circ}\text{C}$), що спричиняє додаткові втрати теплоти, що еквівалентно спалюванню тисяч тон умовного палива на рік.

Технологічні ризики полягають в тому, що порушення температурного режиму роботи металу трубопроводів та корпусів турбін може призвести до нерівномірного термічного розширення, появи тріщин та зниження надійності обладнання.

Порушення умов охорони праці: висока температура поверхонь у робочій зоні створює небезпечні умови для персоналу та порушує санітарно-гігієнічні норми експлуатації.

Особливо актуальним є проведення дослідження в контексті капітальних ремонтів та модернізацій. Верифікація якості виконаних ізоляційних робіт шляхом інструментального обстеження та теплотехнічних розрахунків дозволить не лише оцінити фактичний стан енергоефективності, а й розробити рекомендації щодо впровадження нових теплоізоляційних матеріалів з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання структуризації та мінімізації теплових втрат на великих промислових об'єктах залишається пріоритетним напрямком сучасних енергетичних досліджень. Як свідчать результати аналізу енергоефективності потужних підприємств, зокрема ПАТ «Камет-Сталь» в 2024 р. [2, с.39], навіть за умови стабільного функціонування систем теплопостачання, рівень енерговтрат залишається значним і не опускається нижче 18,9%. Дослідження підтверджують, що найбільша частка неефективності припадає саме на трубопровідні мережі (7,3%) та теплообмінне обладнання (5,8%), що корелює з проблематикою експлуатації ТЕЦ та ТЕС, де стан магістральних паропроводів та допоміжних систем теплопередачі є визначальним фактором загального ККД енергоблоку.

Особлива увага в сучасній науковій літературі приділяється інерційності систем енергозабезпечення: встановлено, що питомі витрати тепла на одиницю продукції мають тенденцію до зростання при зниженні виробничого навантаження, що потребує впровадження систем цифрового моніторингу та адаптивного управління. Отримані дані щодо потенціалу зниження втрат на 6-8% шляхом реконструкції інфраструктури та модернізації ізоляційних елементів підкреслюють доцільність інструментального обстеження об'єктів генерації.

Такий підхід дозволяє сформувати техніко-аналітичну основу для впровадження систем рекуперації та оптимізації режимів теплообміну, що є важливим для стабілізації теплового балансу в умовах змінного графіку навантажень ТЕЦ.

Значний внесок у розв'язання проблем експлуатаційної надійності та теплової ефективності енергообладнання зроблено у колективній монографії за редакцією фахівців НАН України «Моделі та методи підвищення ефективності та безпеки експлуатації об'єктів теплоенергетики» [3]. Авторами обґрунтовано системний підхід до діагностики складних теплоенергетичних об'єктів, що базується на поєднанні традиційних методів теплового контролю з інноваційними алгоритмами машинного навчання (в тому числі архітектур LSTM) для прогнозування аномальних станів. Особливу увагу приділено вирішенню обернених завдань теплопровідності, що дозволяє з високою точністю ідентифікувати параметри теплообміну в зонах з обмеженим доступом. Розроблені математичні моделі температурних полів та методики числового розв'язання функціоналів теплопровідності створюють надійну теоретичну базу для верифікації результатів інструментального обстеження ізоляції енергоблоків, що дозволяє не тільки фіксувати поточні втрати тепла, а й моделювати динаміку деградації захисних конструкцій під впливом.

Окремим стратегічним вектором досліджень є оцінка впливу систем централізованого теплопостачання (СЦТ) на екологічну безпеку та кліматичні зміни [4, с.60]. Згідно з прогнозованими сценаріями розвитку енергетики України до 2050 року, енергетичний сектор генерує близько 65% загального обсягу парникових газів, значна частина яких припадає на спалювання викопного палива у СЦТ. Наукові прогнози вказують на можливість скорочення викидів CO_2 у 2,5-4,4 рази за умови глибокої структурної трансформації галузі. У цьому контексті мінімізація втрат теплової енергії на етапах генерації та транспортування, зокрема шляхом модернізації теплової ізоляції на потужних об'єктах, таких як ТЕЦ та ТЕС, розглядається як ключовий технологічний інструмент реалізації оптимістичного сценарію декарбонізації та підвищення енергоефективності паливного комплексу країни.

Дослідження досвіду впровадження енергоефективних заходів на виробничих підприємствах ЄС [5-8] підтверджує, що ключовими бар'єрами для модернізації є не лише фінансові фактори, а й брак точних знань про енергоефективні вигоди

та специфічні технологічні обмеження. Це актуалізує роль якісного енергетичного аудиту як інструменту виявлення прихованих зон неефективності, що є критично важливим для точної оцінки доцільності оновлення теплової ізоляції на великих енергетичних об'єктах.

Незважаючи на значну кількість теоретичних розробок, залишається недостатньо висвітленим питання фактичної ефективності теплової ізоляції на великих об'єктах генерації (таких як ТЕЦ, ТЕС) безпосередньо після проведення капітальних ремонтів, що й зумовлює необхідність цього дослідження.

Постановка завдання. Ефективність функціонування сучасних ТЕЦ та ТЕС значною мірою лімітується станом теплової ізоляції енерготехнологічного обладнання. Проблема полягає в необхідності підтвердження фактичної енергоефективності ізоляційних конструкцій після проведення капітальних ремонтів, оскільки теоретичні розрахунки не завжди враховують реальні умови експлуатації, якість монтажних робіт та деградацію матеріалів під впливом високих температур.

На прикладі енергоблоку однієї з українських ТЕЦ, забезпеченої потужним котлоагрегатом ТГМП-344 «А» та турбоустановкою відповідної потужності, постає завдання комплексної верифікації стану теплового захисту. Основним викликом є виявлення локальних зон наднормативних втрат теплоти, що виникають внаслідок порушення герметичності кожухів, просідання мінераловатних матів або наявності неізольованих ділянок на складних вузлах (фланцеві з'єднання, арматура, компенсатори).

Метою статті є проведення комплексного інструментально-розрахункового аналізу стану теплової ізоляції основного та допоміжного обладнання енергоблоку ТЕЦ після завершення капітального ремонту для встановлення ступеня його відповідності чинним нормативним вимогам енергоефективності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-практичні завдання:

- проведення інструментального обстеження поверхонь циліндрів високого, середнього та низького тиску турбіни, а також газоповітряних трактів та паропроводів з використанням сучасних засобів тепловізійного контролю та контактної термометрії.

- визначення фактичних питомих теплових втрат через поверхні ізоляції та їх приведення до нормативних умов (температура навколишнього повітря +25 °C) згідно з методиками, закріпленими у ГКД 34.20.507-2003.

- порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних із проектними та нормативними показниками для ідентифікації критичних ділянок, де температура поверхні перевищує встановлений ліміт у +45 °C.

- виявлення та систематизація типових дефектів теплоізоляційних конструкцій (наприклад, на трубопроводах живильних турбонасосів та газоходах), що призводять до неконтрольованого розсіювання теплової енергії.

- розробка практичних рекомендацій щодо модернізації ізоляційних шарів із застосуванням сучасних базальтових та муліто-кремнеземистих матеріалів для мінімізації втрат палива та підвищення ККД енергоблоку в цілому.

Об'єктом дослідження є процеси теплопередачі через багатошарові ізоляційні конструкції обладнання енергоблоку ТЕЦ.

Предметом дослідження є фактичні теплотехнічні показники (температура, тепловий потік) ізоляції турбін, котла та паропроводів у післяремонтний період.

Вирішення цих завдань дозволить не лише оцінити якість проведених ремонтних робіт, а й сформулювати науково обґрунтований підхід до управління енергоефективністю на об'єктах великої генерації в умовах дефіциту паливно-енергетичних ресурсів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилось на базі енергоблоку ТЕЦ потужністю 250 МВт. Основними об'єктами тепловізійного обстеження та теплотехнічних розрахунків стали: котлоагрегат ТГМП-344 «А», циліндри парової турбіни (ЦВТ, ЦСТ-1, ЦСТ-2), а також система паропроводів високого тиску та допоміжні трубопроводи живильних турбонасосів (ЖТН).

На момент проведення випробувань енергоблок працював у сталому режимі з навантаженням, близьким до номінального (70-80%), що забезпечило стабільність температурних полів на поверхнях обладнання. Температура довіклля в машинному залі під час замірів становила в середньому від +17 °C до +30 °C, залежно від відмітки та близькості до джерел тепловиділення.

Методика проведення випробувань наступна: для визначення фактичного стану теплової ізоляції використовувався метод інфрачервоної термографії (тепловізор FLIR T-335) та контактної термометрії. Тепловізійна зйомка дозволила ідентифікувати зони аномального перегріву, що свідчить про дефекти ізоляційного шару або порушення герметичності захисних кожухів.

Розрахунок фактичних питомих теплових втрат (q_f) здійснювався на основі вимірної температури зовнішньої поверхні ізоляції (t_b) та температури довкілля (t_o) за формулою (1):

$$q_f = \alpha \cdot (t_b - t_o) \quad (1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні ізоляції до навколишнього повітря, що враховує конвективну та променеву складові.

Для порівняння результатів із нормативними значеннями (згідно з ГKD 34.20.507-2003) проводилося приведення фактичних втрат до розрахункових умов (температура повітря +25 °C) за формулою (2):

$$q_{py} = q_f \cdot \frac{t_m - 25}{t_m - t_o} \quad (2)$$

де t_m – температура теплоносія всередині обладнання.

Аналіз результатів обстеження турбінного відділення. Результати замірів на циліндрах турбіни показали, що після капітального ремонту більшість поверхонь відповідають нормам. Однак у зонах паровпуску ЦВТ та ЦСТ-1 зафіксовано локальні температури поверхні від 50°C до 62°C, що перевищує нормативні +45 °C. Це зумовлено складністю геометричної форми корпусів та наявністю чисельних фланцевих з'єднань, де щільне прилягання ізоляційних матів ускладнене.

Найбільш критична ситуація виявлена на трубопроводах подачі пари до ЖТН та на лініях відборів пари. На окремих ділянках, де металеве покриття (кожух) було деформоване або відсутнє, температура поверхні сягала 120-150 °C, а у місцях повного руйнування ізоляції – до 450 °C. Питомі теплові втрати на таких ділянках перевищують норму на 150-300%, що створює значний «енергетичний дефіцит» та підвищує температуру в робочій зоні персоналу.

Обстеження котельного відділення: аналіз стану ізоляції газоходів та повітроходів котла ТГМП-344 «А» показав типову проблему для обладнання з тривалим терміном експлуатації – руйнування ізоляції на компенсаторах та лючках-лазах. Через значні вібрації та температурні розширення традиційна мінераловатна ізоляція просідає, утворюючи незахищені ділянки, через які відбуваються значні втрати теплоти відпрацьованих газів, що безпосередньо знижує ККД котлоагрегату.

Основними причинами незадовільного стану окремих вузлів є: механічне пошкодження металевого кожуха під час експлуатації та ремонтних робіт; просідання мінераловатних матів під дією

вібрації та власної ваги на вертикальних ділянках; відсутність ізоляції на складних геометричних елементах (компенсатори, фланці), що потребують знімних ізоляційних конструкцій.

Для підвищення енергоефективності блоку, що розглядався, рекомендовано виконати відновлення захисного алюмінієвого/сталевих покриття на трубопроводах ЖТН. Також потрібно впровадити сучасні багатошарові ізоляційні конструкції на основі базальтового супертонкого волокна (БСТВ) або муліто-кремнеземистих матів для зон з температурою понад 300 °C. Застосувати знімні теплоізоляційні чохла на фланцевих з'єднаннях та запірній арматурі для полегшення доступу під час майбутніх оглядів без руйнування основного ізоляційного шару.

Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка динамічної моделі теплових втрат енергоблоку, яка б дозволяла в режимі реальної години оцінювати економічні збитки від деградації теплової ізоляції та оптимізувати графіки ремонтних робіт.

Висновки. За результатами проведеного комплексно-інструментального обстеження та теплотехнічних розрахунків стану теплової ізоляції обладнання енергоблоку ТЕЦ потужністю 250 МВт після капітального ремонту, можна зробити наступні висновки:

- встановлено, що після проведення ремонтних робіт основні масиви теплової ізоляції корпусів турбіни (ЦВТ, ЦСТ-1, ЦСТ-2) та котлоагрегату ТГМП-344 «А» в цілому забезпечують підтримання технологічних параметрів. Проте інструментальний контроль виявив чисельні локальні зони, де фактичні теплові втрати суттєво перевищують нормативні значення, визначені ГKD 34.20.507-2003.

- виявлено, що на значній кількості ділянок температура зовнішньої поверхні ізоляції перевищує допустиму межу +45 °C. Зокрема, в зонах паровпуску циліндрів турбіни зафіксовано температури 50-62 °C. Найбільш критичні відхилення спостерігаються на допоміжних трубопроводах (пара на ЖТН, лінії відборів), де через руйнування покривного шару температура поверхні сягає 120-150 °C, а на неізольованих ділянках (арматура, лючки) – до 450 °C.

- розрахункове приведення фактичних втрат до нормативних умов показало, що питомі теплові втрати на дефектних ділянках перевищують норму на 150–300%. Це призводить до нераціонального використання палива та зниження загального ККД енергоблоку. Наявність зон з відсутньою ізоляцією на газоходах котла додатково збільшує втрати тепла з відхідними газами, що негативно впливає на екологічні та економічні показники ТЕЦ.

Список літератури:

1. ГКД 34.20.507-2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. ПТЕ, м. Харків 2019 р.
2. Horskyi, V. Efficiency of thermal energy consumption at industrial enterprises of Ukraine in conditions of environmental restrictions. *Journal of Kryvyi Rih National University*. 2025. № 23(1), p. 32-43. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2025-1-23-32-43>
3. Babak, V.P., Zaporozhets, A.O., Sverdlova, A.D., & Khaidurov, V.V. Models and methods of improving the efficiency and safety of the operation of thermal power equipment. *Kyiv: Naukova Dumka*. 2023. doi: 10.15407/978966-00-1931-7.
4. Derii, V., Nechaieva, T., & Leshchenko, I. Assessment of the effect of structural changes in ukraine's district heating on the greenhouse gas emissions. *Science and Innovation*. 2023. № 19(4), p. 57–65. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.057>
5. Trianni, A.; Cagno, E.; Farné, S. Barriers, Drivers and Decision-Making Process for Industrial Energy Efficiency: A Broad Study among Manufacturing Small and Medium-Sized Enterprises. *Appl. Energy*. 2016. №162, p. 1537–1551. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.078>
6. Lunt, P., Ball, P., & Levers, A. Barriers to industrial energy efficiency. *International Journal of Energy Sector Management*. 2014. №8(3), p. 380-394. <https://doi.org/10.1108/IJESM-05-2013-0008>
7. Wagner, C., Obermeyer, M., & Lüchinger, R. A methodology for the assessment of multiple benefits of industrial energy efficiency measures. *SN Applied Sciences*. 2020. № 2(2), 270 p. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2071-2>
8. Naik, S., & Mallur, S. B. The benefits of energy efficiency in small and medium enterprises. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. 2018, June. Vol. 376, No. 1, p. 012116. IOP Publishing. DOI 10.1088/1757-899X/376/1/012116PTM 24.020.16-73.
9. Лементар С.Ю Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Моделювання газодинаміки вологої пари в головних паропроводах атомної електростанції. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2021. № 5 (32). С. 159-167. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/25>
10. Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Аналіз підходів до оцінки теплового та напружено-деформованого стану елементів паропроводів АЕС. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. № 30 (69) Частина № 2. С. 12-16.

Bednarska I.S. Lishchuk S.R. ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF THERMAL INSULATION OF CHP POWER UNIT EQUIPMENT IN THE POST-REPAIR PERIOD

The article is devoted to the urgent problem of increasing energy efficiency and operational reliability of electric and thermal energy generation facilities in Ukraine in conditions of energy shortage and significant wear of the main power equipment of power plants. The object of the study is the processes of heat transfer through multilayer insulating structures of the equipment of the power unit of the thermal power plant with a capacity of 250 MW. The authors conducted a comprehensive instrumental and computational analysis of the state of thermal insulation of the boiler unit, steam turbine cylinders and steam pipeline system immediately after the completion of the overhaul. The work used the method of infrared thermography (using the FLIR T-335 thermal imager) and contact thermometry to identify zones of abnormal overheating. The scientific novelty of the study lies in the verification of actual specific heat losses and their reduction to regulatory conditions in accordance with technical documents. It was found that during routine repairs, in practice, there is a significant discrepancy between actual indicators and design values. In particular, local zones on turbine housings with a temperature of 50-62 °C and critical defects on steam supply pipelines to feed turbopumps were detected, where the surface temperature reaches 120-450 °C due to the destruction of the insulation layer. It was proven that heat losses in defective areas exceed the norm by 150-300%, which leads to excessive fuel consumption and violation of sanitary and hygienic standards of work. The authors systematized the causes of insulation degradation: mechanical damage to casings, subsidence of mineral wool mats and lack of insulation on complex geometric nodes. Based on the results of the study, practical recommendations were developed for the introduction of modern basalt and mullite-silica materials, as well as removable thermal covers for shut-off valves.

Keywords: thermal insulation, energy efficiency, CHP, heat loss, thermography, power unit, specific fuel consumption, temperature, pipelines, turbine cylinders, steam pipelines, insulation degradation, energy security.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Eyyubova K.<https://orcid.org/0009-0003-8856-4002>

Mingachevir State University, Azerbaijan

COMPARATIVE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF DIFFERENT TYPES OF HEAT EXCHANGERS

Heat exchangers are among the most important components used in many industrial thermal systems such as power plants, chemical processes, refrigeration systems, and HVAC applications. Their efficient utilization plays a significant role in improving energy efficiency and reducing operational costs. In particular, the selection of an appropriate heat exchanger type is a crucial factor affecting the thermal performance and reliability of energy systems. In this study, a comparative thermodynamic analysis of three different heat exchanger types—double pipe, shell-and-tube, and plate heat exchangers—was performed experimentally. The performance of these heat exchangers was evaluated under different operating conditions. The cold water flow rate in the experimental setup was kept constant at 1.5 L/min, while the hot water flow rate was varied as 0.8, 1.6, and 2.4 L/min. In addition, the hot water inlet temperature was selected as 50°C, 60°C, and 70°C. Experiments were carried out for both parallel-flow and counter-flow configurations. The thermodynamic performance of each heat exchanger was evaluated using heat transfer rate and power density parameters calculated from the experimental data. The results showed that increasing the inlet temperature and flow rate significantly enhanced the heat transfer rate. Furthermore, the counter-flow configuration provided better thermal performance compared to the parallel-flow configuration. Among the tested heat exchanger types, the shell-and-tube heat exchanger exhibited the highest power density, while the double pipe heat exchanger showed the lowest performance. The obtained results indicate that the appropriate selection of heat exchanger type can significantly improve the efficiency of thermal systems. The findings of this study provide useful experimental data for selecting suitable heat exchanger types in thermal systems and may contribute to improving the efficiency of industrial heat transfer applications. In addition, the presented analysis may serve as a useful reference for future experimental and numerical studies on heat exchanger performance. Furthermore, the obtained results highlight the importance of selecting appropriate operating conditions and heat exchanger configurations in practical applications. The experimental comparison presented in this study contributes to a better understanding of the performance differences among commonly used heat exchanger types and may support engineers and researchers in designing more efficient thermal systems.

Keywords: Heat exchanger; thermodynamic analysis; heat transfer; double pipe heat exchanger; shell-and-tube heat exchanger; plate heat exchanger; thermal performance.

Introduction. Thermal applications play a significant role in meeting the increasing global demand for energy. In such systems, cost, efficiency, and environmental considerations are among the most important factors that must be addressed. Efficient utilization of energy while minimizing environmental impact has therefore become a major objective in modern thermal engineering systems. In this context, heat exchangers are considered one of the most essential components of thermal applications [3]. Heat exchangers are devices that enable heat transfer between two or more fluids at different temperatures without direct mixing. Such heat transfer processes are widely encountered in many engineering applications including heating, ventilation and air-condition-

ing (HVAC) systems, refrigeration technologies, and industrial heat recovery systems [4, 5]. Due to their importance in energy systems, improving the thermal performance of heat exchangers has become a major research focus in recent years [6].

Various techniques have been proposed to enhance heat transfer performance in heat exchangers, including the use of extended surfaces, surface modifications, and turbulence generation within the flow field [7]. In addition, selecting the most appropriate heat exchanger configuration is a crucial step in solving heat transfer problems. The selection process generally depends on operating parameters such as temperature levels, flow rates, pressure drops, construction materials, and economic considerations [8-12]. Among different heat

exchanger types, tubular heat exchangers are widely used in industrial applications due to their relatively simple structure and effective heat transfer performance. In these systems, one fluid flows through the tubes while the second fluid flows outside the tubes, allowing heat transfer through the tube wall. Tubular heat exchangers can be designed in different configurations such as shell-and-tube, double-pipe, and spiral heat exchangers. Among these types, shell-and-tube heat exchangers are the most widely used because they can operate under a wide range of temperatures and pressures. Shell-and-tube heat exchangers consist of a shell containing a bundle of tubes through which one fluid flows while the second fluid circulates on the shell side. Their flexible design allows them to be manufactured in various sizes and flow arrangements, making them suitable for many industrial processes [12]. The heat transfer performance of these heat exchangers depends on several geometric and operational parameters such as tube diameter, shell diameter, tube arrangement, and baffle configuration [13]. Numerous studies have been conducted to improve the performance of shell-and-tube heat exchangers. For example, Shah and Sekulic (2003) and Abd and Naji (2017) investigated the influence of geometric parameters on heat transfer characteristics. Similarly, Shinde and Chavan (2017) reported that tube spacing and baffle configuration significantly affect heat transfer performance. Other studies have also shown that parameters such as baffle spacing, tube arrangement, and shell diameter play an important role in improving heat transfer efficiency and reducing pressure losses [14–18]. Double-pipe heat exchangers represent one of the simplest heat exchanger configurations. In this design, a smaller pipe is placed concentrically inside a larger pipe, allowing one fluid to flow through the inner pipe while the other flows through the annular space. Due to their simple construction, flexibility, and relatively low installation and maintenance costs, double-pipe heat exchangers are widely used in industrial applications. However, their main limitation is the relatively large surface area required for high heat transfer rates [18]. Various studies have proposed methods for improving their thermal performance through the use of turbulence promoters and enhanced surfaces. Plate heat exchangers are another widely used heat exchanger type consisting of thin metal plates that form flow channels between them. These heat exchangers are known for their compact structure and high heat transfer efficiency due to the turbulence generated by the plate geometry. Plate heat exchangers are commonly used in heating, cooling, heat recovery, condensation, and evaporation processes [19]. In applications involving high operating pressures, heat exchangers designed for low-pressure conditions are

generally unsuitable. For operating temperatures below approximately 200 °C, gasketed plate heat exchangers are often preferred due to their compact design and high efficiency. However, for systems operating at higher temperatures and pressures, double-pipe, shell-and-tube, or welded plate heat exchangers are typically more suitable. In particular, double-pipe heat exchangers are appropriate for small-capacity systems operating under relatively high-pressure conditions [20].

Researchers have also applied different optimization techniques to improve the thermal performance of heat exchanger systems. Several studies have used advanced optimization algorithms to enhance the performance of shell-and-tube, plate-fin, and regenerative heat exchangers [21,22]. In this study, the thermal performance of different heat exchanger types is comparatively analyzed, and the effects of varying flow rate and temperature on heat exchanger performance are investigated. Despite the extensive research conducted on heat exchanger design and performance optimization, comparative experimental studies evaluating different heat exchanger types under similar operating conditions remain limited in the literature. In particular, the influence of varying flow rates and inlet temperatures on the thermal performance of different heat exchanger configurations requires further investigation. Therefore, the present study aims to provide a comparative thermodynamic analysis of different heat exchanger types under controlled experimental conditions in order to better understand their performance characteristics.

Materials and methods

The schematic diagram of the experimental setup used in this study is presented in Figure 1.

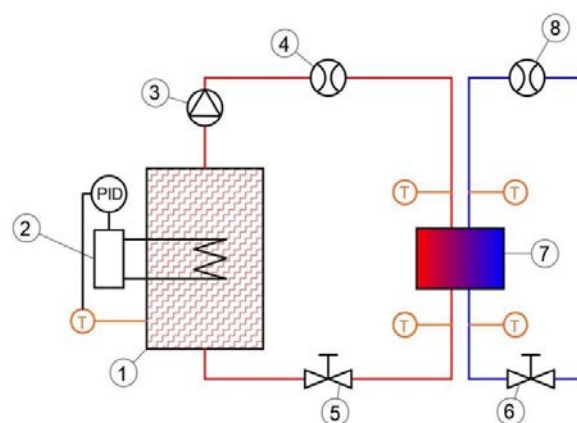


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental heat exchanger test system
 1 – Tank; 2 – Electric heater; 3 – Pump; 4 – Flow meter (hot water); 5 – Control valve (hot water); 6 – Control valve (cold water); 7 – Heat exchanger; 8 – Flow meter (cold water)

The experimental system mainly consists of two main sections: a heating tank used for heating the hot water and a test section where different types of heat exchangers are installed. The water in the tank is heated by an electrical resistance heater. A Pt100 temperature sensor located in the middle of the tank is connected to a PID temperature controller, which allows the water temperature to be adjusted to the desired level. A circulation pump located at the outlet of the tank is used to control the flow rate of the working fluid. The heated fluid passes through a vane-type flow meter and the heat exchanger before returning to the tank, completing the circulation loop. The heat exchanger section of the experimental setup is modular, allowing different heat exchanger types to be easily installed or removed using connection fittings. In the test section, four connection hoses are used for the inlet and outlet of the heat exchangers: two for the hot fluid line and two for the cold fluid line. Temperature measurements at both the inlet and outlet of the hot and cold streams are obtained using K-type thermocouples.

All experimental data are monitored and recorded through an automation system. The heat exchanger types used in the performance tests and their corresponding flow configurations are illustrated in Figure 2.

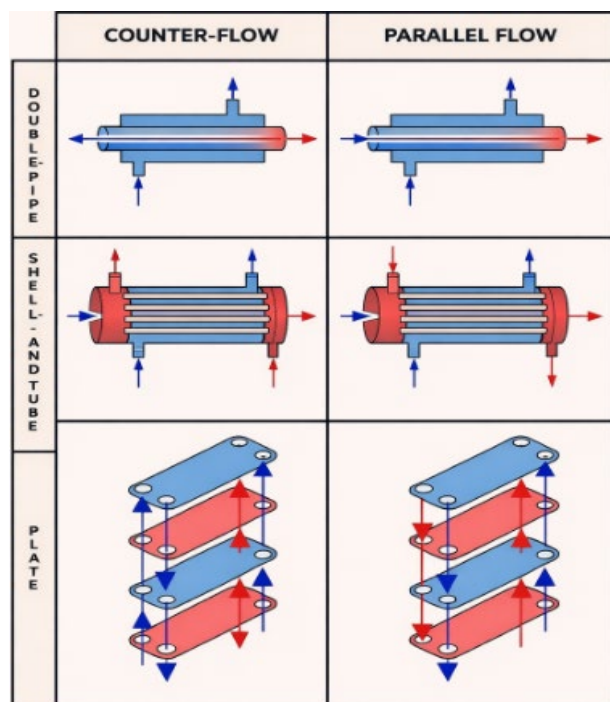


Fig. 2. Schematic representation of counter-flow and parallel-flow configurations for different heat exchanger types: double-pipe, shell-and-tube, and plate heat exchangers.

Data Processing

In the experimental system, it was assumed that the entire heat transferred by the hot fluid in the test section was conveyed to the cold fluid through the convection mechanism. Therefore, heat losses to

the surroundings were neglected, and the amount of heat absorbed by the cold fluid was calculated using Equation (1). The ratio of Equation (2) to Equation (1) was used to verify whether the heat losses in the system were negligible. Since the three different heat exchanger types installed in the test section have different heat transfer surface areas, the heat transfer areas vary for each configuration. Equation (3) represents the power density values obtained by dividing the heat transfer rate of each heat exchanger by its corresponding heat transfer surface area.

The heat exchanger types used in the experiments and their corresponding heat transfer surface areas are presented in Table 1.

Table 1
Heat exchanger types used in the experiments and their heat transfer surface areas

Heat Exchanger Type	Heat Transfer Surface Area (m ²)
Double-Pipe Heat Exchanger	0.025
Plate Heat Exchanger	0.048
Shell-and-Tube Heat Exchanger	0.020

$$Q_{\text{gain}} = m \cdot C_p (T_{\text{out,c}} - T_{\text{in,c}}) \quad (1)$$

$$Q_{\text{loss}} = m \cdot C_p (T_{\text{in,h}} - T_{\text{out,h}}) \quad (2)$$

$$q'' = Q/A \quad (3)$$

Uncertainty Analysis

The uncertainty of the experimental parameters was evaluated using the method proposed by Kline and McClintock [23]. In this method, R represents the result function of the system, while $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ denote the independent variables affecting R :

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

If $w_1, w_2, \dots, w_n$ represent the uncertainties of the independent variables, the overall uncertainty of the result can be calculated as follows (Kline and McClintock, 1953):

$$W = [(\partial R / \partial x_1 \cdot w_1)^2 + (\partial R / \partial x_2 \cdot w_2)^2 + \dots + (\partial R / \partial x_n \cdot w_n)^2]^{1/2} \quad (4)$$

In this study, the uncertainties of the main experimental parameters, temperature and flow rate, were calculated using the values presented in Table 2. The uncertainty of temperature measurement was determined as $\pm 1.224^\circ\text{C}$, while the uncertainty of the flow rate measurement was ± 0.0141 .

Device	Technical Specification	Accuracy	Total Uncertainty
Data logger	K-type thermocouple; measurement range ($-200^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$)	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	$\pm 1.224^\circ\text{C}$
Flow meter	Measurement range ($0 - 30 \text{ L/min}$)	$\pm 0.01 \text{ L/min}$	± 0.0141

Results and Discussion

In this section, the power outputs of three different heat exchanger types used in the experiments are presented and compared under different temperature and flow rate conditions. In addition, the power density values of the heat exchangers are evaluated. Both temperature and flow rate significantly affect the performance of the heat exchangers. For all three heat exchanger types, the counter-flow configuration showed better performance than the parallel-flow configuration under the same operating conditions.

For the double-pipe heat exchanger under counter-flow conditions at a flow rate of 2.4 L/min, the power values were 1440.7 W, 1527.6 W, and 1609.1 W at 50 °C, 60 °C, and 70 °C, respectively.

For the shell-and-tube heat exchanger, the corresponding power values were 1538 W, 1628.4 W, and 1696.3 W.

For the plate heat exchanger, the power values were significantly higher, reaching 3955.2 W, 3996.4 W, and 4098.9 W at the same temperature conditions.

These values correspond to the results obtained at a flow rate of 2.4 L/min under counter-flow conditions. The power values for other flow rates are presented graphically in Figures 3, 4, and 5. Although the plate heat exchanger produced the highest power output, the highest power density (power per unit heat transfer area) was not obtained from the plate heat exchanger. The power density results are presented in Figures 6, 7, and 8.

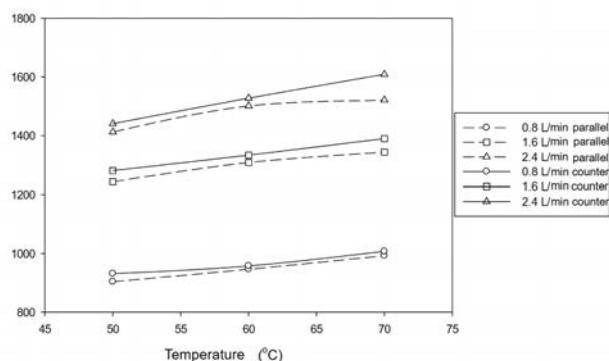


Fig. 3. Temperature–power graph for the double-pipe heat exchanger

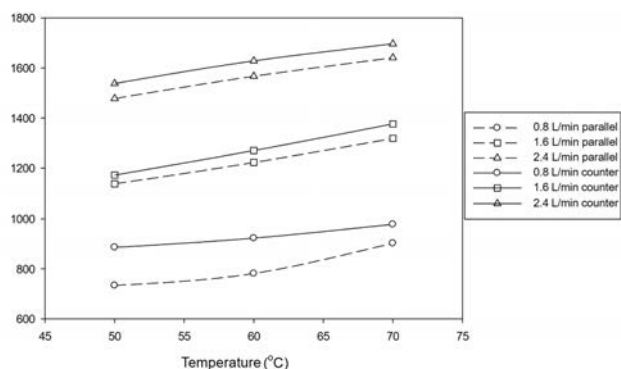


Fig. 4. Temperature–power graph for the shell-and-tube heat exchanger

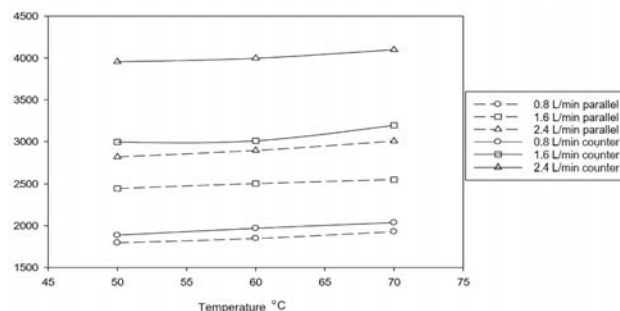


Fig. 5. Temperature–power graph for the plate heat exchanger

As can be seen from the obtained values, variations in temperature and flow rate resulted in different responses for each heat exchanger type. It is considered that this variation is closely related to the heat exchanger type and its design characteristics. Based on the experimental data, selecting the optimum operating parameters and the appropriate heat exchanger type significantly affects the thermal performance.

When Figures 6, 7, and 8 are examined, it is observed that the highest power density was obtained in the shell-and-tube heat exchanger, while the lowest power density was obtained in the double-pipe heat exchanger. For each heat exchanger type, better performance was achieved under counter-flow conditions.

For the shell-and-tube heat exchanger, which showed the best performance, the power density values at hot water flow rate of 0.8 L/min were 44.28 kW/m², 46.13 kW/m², and 48.88 kW/m² at temperatures of 50, 60, and 70 °C, respectively. At a hot water flow rate of 1.6 L/min, the power density values at 50, 60, and 70 °C were 59.60 kW/m², 63.51 kW/m², and 68.82 kW/m², respectively. When the hot water flow rate was 2.4 L/min, the power density values at 50, 60, and 70 °C were 92.61 kW/m², 96.94 kW/m², and 99.60 kW/m², respectively.

Based on these results, the highest power obtained per unit heat transfer area (m²) was 99.60 kW/m² using the shell-and-tube heat exchanger under counter-flow conditions at a flow rate of 2.4 L/min. On the other hand, the lowest power value was obtained with the double-pipe heat exchanger under parallel-flow conditions at a flow rate of 0.8 L/min, with a value of 36.15 kW/m².

Figures 6, 7, and 8 present the power density values at different flow rates for the heat exchanger types used in the experiments.

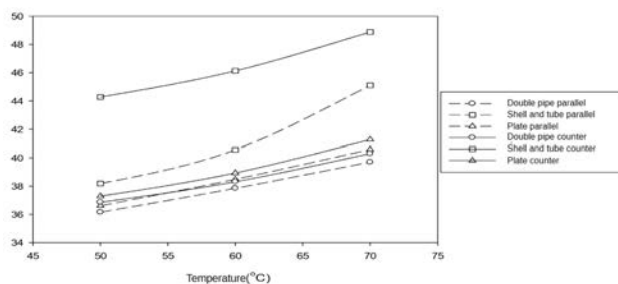


Fig. 6. Power density comparison of different heat exchanger types at a flow rate of 0.8 L/min

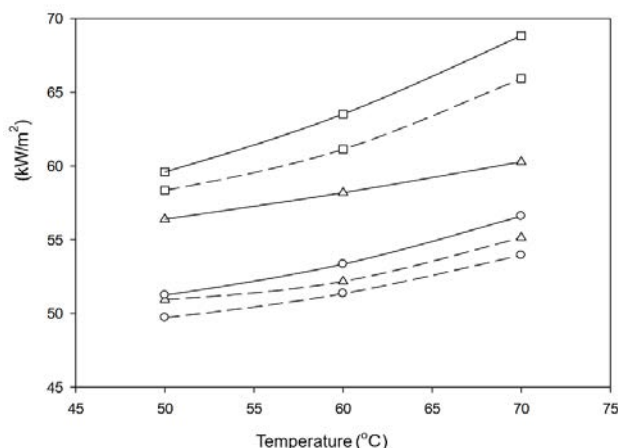


Fig. 7. Power density comparison of different heat exchanger types at a flow rate of 1.6 L/min

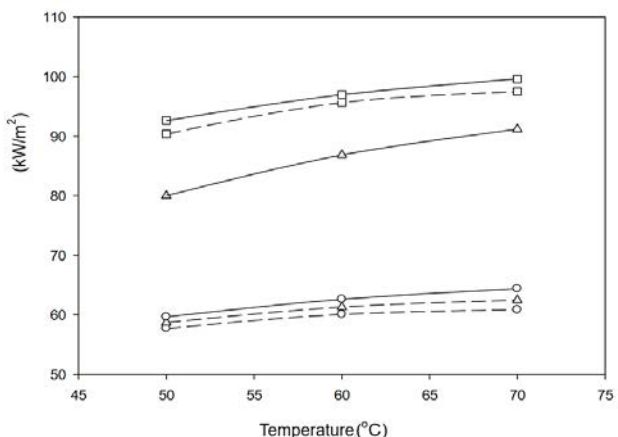


Fig. 8. Power density comparison of different heat exchanger types at a flow rate of 2.4 L/min

Conclusion. Heat exchangers are widely used in industrial thermal systems, and their efficient utilization plays a critical role in improving heat transfer

performance. In this study, the performances of three commonly used heat exchanger types—double-pipe, shell-and-tube, and plate heat exchangers—were experimentally compared. The experiments were conducted at three inlet water temperatures (50 °C, 60 °C, and 70 °C) and three flow rates (0.8 L/min, 1.6 L/min, and 2.4 L/min). The experimental results indicated that increasing both the inlet water temperature and flow rate significantly enhanced the heat transfer rate. In addition, for all heat exchanger types, the counter-flow configuration provided better thermal performance compared to the parallel-flow configuration. Among the investigated heat exchanger types, the shell-and-tube heat exchanger demonstrated the highest sensitivity to temperature changes. The counter-flow configuration improved the power density by approximately 3.87% for the shell-and-tube heat exchanger, 3.89% for the double-pipe heat exchanger, and 11.53% for the plate heat exchanger compared to the parallel-flow configuration. The influence of flow direction was found to be most significant in the plate heat exchanger, while the double-pipe and shell-and-tube heat exchangers exhibited similar sensitivity to flow direction.

Furthermore, under counter-flow conditions, the shell-and-tube heat exchanger provided approximately 19.06% higher power density compared to the double-pipe heat exchanger, while the plate heat exchanger provided approximately 9.09% higher power density. Under parallel-flow conditions, the shell-and-tube heat exchanger achieved about 18.08% higher power density than the double-pipe heat exchanger, whereas the plate heat exchanger provided approximately 1.61% higher power density. Overall, considering the power density per unit heat transfer area, the performance ranking of the investigated heat exchangers from highest to lowest was determined as: shell-and-tube heat exchanger, plate heat exchanger, and double-pipe heat exchanger. In addition, the results of this study demonstrate that the appropriate selection of heat exchanger type and operating conditions can significantly influence the overall efficiency of thermal systems. The experimental findings obtained in this work may provide useful guidance for engineers and researchers in selecting suitable heat exchanger configurations for various industrial applications.

Bibliography:

1. Yang J., Liu W. Numerical investigation on shell-and-tube heat exchangers. *Energy Conversion and Management*, vol. 105, pp. 431–439, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.083>
2. Marzouk S. A., Abou Al-Sood M. M. Comparative numerical study of shell-and-tube heat exchanger performance with different baffle configurations. *International Journal of Thermal Sciences*. vol. 177. p. 107507. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107507>

3. Dal H. *Thermodynamic Analysis of Heat Exchangers*. Ankara: Engineering Publications, 2019.
4. Kızılkın Ö. Investigation of heat transfer characteristics in shell-and-tube heat exchangers. *Energy Education Science and Technology*. vol. 19. no. 2. pp. 111–120, 2007.
5. Genceli O. F. *Heat Exchangers*. İstanbul: Birsen Publishing, 1999.
6. Boran K., Yilmaz M., Koca A. Heat transfer enhancement techniques in heat exchangers: A review study. *Applied Thermal Engineering*. vol. 65. no. 1–2. pp. 1–10. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.048>
7. Liou T. M., Hwang J. J. Turbulent heat transfer enhancement using surface modifications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. vol. 35. no. 4. pp. 1075–1085. 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(92\)90210-R](https://doi.org/10.1016/0017-9310(92)90210-R)
8. Yilmaz T., Şara O. N. Heat exchanger selection criteria for industrial thermal systems. *Energy Conversion and Management*. vol. 41. no. 10. pp. 1043–1055. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00139-4)
9. Walker W. H. *Industrial Heat Exchanger Design and Applications*. New York: McGraw-Hill, 1990.
10. Saunders E. A. D. *Heat Exchangers: Selection, Design and Construction*. New York: Longman Scientific & Technical, 1988.
11. Fraas A. P. *Heat Exchanger Design*. New York: Wiley, 1989.
12. Mirzaei M., Akhavan-Behabadi M. A., Keshavarz A. Thermal performance evaluation of shell-and-tube heat exchangers with different tube arrangements. *International Journal of Thermal Sciences*. vol. 115. pp. 87–98. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.01.006>
13. Liu W., Liu Z., Wang J. Performance analysis of shell-and-tube heat exchangers under different geometric configurations. *Applied Thermal Engineering*. vol. 105. pp. 438–448, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.083>
14. Shah R. K., Sekulic D. P. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470172605>
15. Abd A. A., Naji S. Z. Experimental and numerical investigation of shell-and-tube heat exchangers. *Case Studies in Thermal Engineering*. vol. 10. pp. 80–90, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.03.002>
16. Shinde K. B., Chavan V. M. Experimental investigation of baffle spacing effects in shell-and-tube heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*. vol. 121. pp. 115–124. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.004>
17. Li H., Kottke V. Effect of baffle spacing on pressure drop and heat transfer in shell-and-tube heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 41, no. 10, pp. 1303–1311, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00282-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00282-6)
18. Karno A., Ajib S. Experimental study on the pressure drop and heat transfer in shell-and-tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 11–12, pp. 1168–1174, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.11.020>
19. Kakaç S., Liu H. *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*. Boca Raton: CRC Press, 2002.
20. Özden E., Tari İ. Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger. *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 5, pp. 1004–1014, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.019>
21. Bahadori A. *Heat Exchanger Design Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2011.
22. Ammar Y., Abbas M., Khalil K. Experimental investigation of heat transfer enhancement in shell-and-tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 575–584, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.045>
23. Kline S. J., McClintock F. A. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*. vol. 75, pp. 3–8, 1953.

Любова К. ПОРІВНЯЛЬНИЙ ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ РІЗНИХ ТИПІВ ТЕПЛООБМІННИКІВ

Теплообмінники є одними з найважливіших компонентів, що використовуються у багатьох промислових теплових системах, таких як електростанції, хімічні процеси, холодильні системи та системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря (HVAC). Ефективне використання теплообмінників відіграє важливу роль у підвищенні енергоефективності та зниженні експлуатаційних витрат. Тому аналіз і порівняння різних типів теплообмінників привертають значну увагу в останні роки [1–3].

Зокрема, вибір відповідного типу теплообмінника є ключовим фактором, що впливає на теплову ефективність і надійність енергетичних систем. У цьому дослідженні експериментально проведено порівняльний термодинамічний аналіз трьох різних типів теплообмінників: двотрубного, кожухотрубного та пластинчастого теплообмінників. Ефективність цих теплообмінників оцінювалася

за різних умов експлуатації. Витрата холодної води в експериментальній установці підтримувалася сталою на рівні 1,5 л/хв, тоді як витрата гарячої води змінювалася і становила 0,8; 1,6 та 2,4 л/хв. Крім того, температура на вході гарячої води була обрана на рівні 50°C, 60°C і 70°C. Експерименти проводилися як для паралельної, так і для протитечійної схем руху теплоносіїв. Термодинамічні характеристики кожного теплообмінника оцінювалися за допомогою параметрів теплового потоку та густини потужності, розрахованих на основі експериментальних даних. Результати показали, що підвищення температури на вході та витрати рідини суттєво збільшує інтенсивність теплопередачі. Крім того, протитечійна схема забезпечує кращу теплову ефективність порівняно з паралельною. Серед досліджених типів теплообмінників кожухотрубний теплообмінник продемонстрував найвищу густину потужності, тоді як двотрубний теплообмінник показав найнижчу ефективність. Отримані результати свідчать про те, що правильний вибір типу теплообмінника може суттєво підвищити ефективність теплових систем. Результати цього дослідження надають корисні експериментальні дані для вибору відповідних типів теплообмінників у теплових системах і можуть сприяти підвищенню ефективності промислових процесів теплопередачі. Крім того, представлений аналіз може слугувати корисним джерелом для подальших експериментальних і чисельних досліджень ефективності теплообмінників. Отримані результати також підкреслюють важливість правильного вибору умов експлуатації та конфігурацій теплообмінників у практичних застосуваннях. Представлене експериментальне порівняння сприяє кращому розумінню відмінностей у продуктивності між поширеними типами теплообмінників і може допомогти інженерам та дослідникам у проектуванні більш ефективних теплових систем.

Ключові слова: теплообмінник, термодинамічний аналіз, теплообмін, двотрубний теплообмінник, кожухотрубний теплообмінник, пластинчастий теплообмінник, теплові характеристики.

Дата першого надходження статті до видання: 11.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Klymenko V.M.

<https://orcid.org/0009-0005-9532-6744>

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Avdieieva O.P.

<https://orcid.org/0000-0002-9358-4265>

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Usatiy O.P.

<https://orcid.org/0000-0002-8568-5007>

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF GAS TURBINE BLADE MATERIALS BASED ON LIFE CYCLE ASSESSMENT: INTEGRATING ECONOMIC, ENVIRONMENTAL, AND PERFORMANCE METRICS

Material selection for first-stage gas turbine blades has historically prioritized high-temperature mechanical performance and first cost, while underrepresenting life-cycle environmental burdens, end-of-life (EOL) value, and time-dependent degradation effects that accumulate over decades of operation. This creates systematic biases in design decisions under carbon pricing and circular-economy policies. This study develops an integrated multi-criteria decision framework to identify Pareto-optimal turbine-blade materials by jointly minimizing life-cycle cost (LCC) and global warming potential (GWP), while maximizing operational efficiency and power density under realistic degradation trajectories. We formulate a cradle-to-grave life cycle assessment (LCA) and net-present-value (NPV) life cycle cost model with an explicit coupling to degradation-driven efficiency decay. The operational efficiency is modeled as depend on temperature, stress, and material-specific kinetics. Environmental impacts follow ISO 14040/14044 and account for production, operation, and EOL recycling credits. The multi-objective problem is solved using NSGA-III with feasibility constraints on stress, temperature margin, creep rate, and oxidation kinetics. For a representative 400 MW combined-cycle-class turbine (7000 h/yr, 25 yr design life), operational fuel-related impacts dominated both LCC and GWP across candidates (typically 65–78% of discounted LCC). Incorporating degradation increased discounted operational costs by 15–23% compared with static-efficiency assumptions, altering rankings and expanding the Pareto set. High-recyclability options (Inconel 718, Ti-6Al-4V) achieved an 8–12% reduction in total GWP versus low-recyclability single-crystal alternatives under equivalent boundary conditions, while premium single-crystal CMSX-4 became favorable only in high-temperature, baseload-dominant scenarios where 2–3% efficiency gains amortize over lifetime. Coupling LCC–LCA with degradation is necessary for robust material selection under carbon pricing and circular-economy constraints. The proposed framework produces stakeholder-specific Pareto-optimal recommendations and is extensible to other high-temperature energy systems.

Keywords: Life cycle assessment, Multi-criteria optimization, Turbine blade materials, Pareto optimization, Circular economy

Formulation of the problem. Gas turbines remain a critical technology for electricity systems due to their high-power density, dispatchability, and compatibility with combined-cycle configurations. At the same time, the sector operates under intensifying constraints: higher turbine inlet temperatures are pursued to improve thermal efficiency, while carbon pricing and sustainability policies require quantifiable reductions of life-cycle greenhouse gas (GHG)

emissions. In this context, the first-stage blade is an archetypal “extreme” component: it experiences high centrifugal stresses, aggressive oxidation/corrosion environments, and thermal gradients, all while directly influencing aerodynamic performance and thus fuel consumption over decades.

Conventional blade-material selection is typically framed as a materials-science optimization problem: maximize creep strength and oxidation resistance,

ensure manufacturability, and meet a cost target based largely on upfront procurement and processing. However, a blade material is also an economic and environmental decision. Small differences in achievable efficiency, and especially in efficiency retention under degradation, can dominate discounted fuel costs and operational emissions. Likewise, end-of-life routes—scrap value, closed-loop recycling, and substitution of virgin alloy production—can yield meaningful credits within a cradle-to-grave boundary, yet are rarely integrated explicitly into early material-choice decisions.

This creates an important methodological issue: when selection ignores time-dependent degradation and circularity, the optimization landscape is distorted. Materials that deliver high initial efficiency but degrade more rapidly may appear favorable under static assumptions, while durable and recyclable candidates may be undervalued. As carbon prices increase and circular-economy requirements tighten, such distortions translate into non-trivial financial and compliance risks.

Analysis of recent research and publications.

Nickel-based superalloys (e.g., Inconel series, René alloys) and single-crystal (SX) superalloys (e.g., CMSX families) have been the workhorse for hot-section blades due to their creep resistance at elevated temperature, microstructural stability, and compatibility with protective coatings and thermal barrier systems. Traditional screening emphasizes properties such as high-temperature yield/creep strength, oxidation resistance, thermal fatigue resistance, and manufacturability (casting route, heat-treatment windows, defect tolerance). Foundational reviews and monographs [1, 2] summarize the evolution from equiaxed to directionally solidified and SX alloys, including the role of γ/γ' microstructures, refractory-element additions, and coating interactions [1; 2]. Nevertheless, these approaches usually treat performance as a quasi-static attribute measured at beginning-of-life or under short test durations.

Life cycle assessment (LCA), standardized by ISO 14040/14044, provides a structured method to quantify environmental impacts across production, operation, and end-of-life stages. In energy technologies, LCA is routinely applied to fuels, power plants, and major infrastructure, but component-level LCA for high-temperature alloys is less common and often limited by data granularity. The literature documents [3-7] that operation-phase impacts can dominate for fossil-based generation, while manufacturing may become relatively more important as grids decarbonize. Environmental product declarations (EPDs) and background databases provide emission factors for

metals, but alloy-specific pathways, scrap fractions, and recycling substitution assumptions can change results materially [3, 4, 5, 6, 7].

Multi-criteria decision-making (MCDM) methods (e.g., TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE) and evolutionary multi-objective optimization (e.g., NSGA-II/III, MOPSO) have been widely used in engineering design to navigate trade-offs among cost, performance, and sustainability metrics. In material selection specifically, MCDM methods provide transparent ranking but can be sensitive to normalization and subjective weights, while Pareto-based evolutionary algorithms provide sets of non-dominated solutions and allow stakeholder-specific ex post selection [8, 9, 10, 11]. However, many studies treat the evaluation functions as static and do not incorporate time-dependent degradation that affects both economics and emissions through efficiency.

Blade degradation arises from multiple coupled mechanisms: creep, oxidation, hot corrosion, and thermal fatigue. Creep is often captured using constitutive relations such as Norton power-law creep and damage mechanics extensions (e.g., Kachanov–Rabotnov) to represent tertiary creep and rupture. Oxidation and corrosion kinetics may be approximated by parabolic rate laws with Arrhenius temperature dependence. When integrated into reliability and maintenance planning, degradation models support life prediction and inspection intervals; yet their explicit integration into LCC–LCA-driven material selection is not standard practice [12, 13, 14].

To the best of our knowledge, no study has integrated (i) cradle-to-grave LCA with explicit recycling credits, (ii) discounted life cycle costing, and (iii) time-dependent degradation-driven efficiency decay in a unified multi-objective optimization framework for gas turbine blade material selection. In particular, the coupling between degradation and both economic and environmental operational metrics is frequently simplified or neglected, and recyclability is rarely treated as a first-class optimization variable rather than a qualitative discussion point.

Task statement.

This work aims to:

1. develop an integrated LCC–LCA model for turbine blade materials under a cradle-to-grave boundary;
2. incorporate time-dependent degradation (creep and corrosion/oxidation) into efficiency and cost/emissions accounting;
3. quantify trade-offs among economic, environmental, and performance objectives;
4. generate Pareto-optimal material portfolios/choices using NSGA-III;

5. demonstrate the method on an industrial gas turbine case study.

Outline of the main material of the study. Mathematical framework.

Life cycle cost (LCC) model. For a material choice, the discounted life cycle cost is:

$$LCC(m) = C_{\text{initial}}(m) + C_{\text{operation}}(m) + C_{\text{maintenance}}(m) - C_{\text{EOL}}(m). \quad (1)$$

Initial costs. Let $M_{\text{blade}}(m) = \rho(m)V_{\text{blade}}$ be blade mass based on density ρ and blade volume V_{blade} .

$$C_{\text{initial}}(m) = M_{\text{blade}}(m) \left[P_{\text{mat}}(m)(1 + w_{\text{scrap}}) + C_{\text{mfg}}(m) \right], \quad (2)$$

where P_{mat} is material price, w_{scrap} is a scrap fraction in manufacturing, and C_{mfg} aggregates machining, coating, heat treatment, and inspection.

Operational costs (NPV). Degradation affects efficiency and thus fuel cost over time:

$$C_{\text{operation}}(m) = \sum_{t=1}^T \frac{P_{\text{fuel}}(m, t) H_{\text{annual}} P_{\text{fuel}}(t)}{(1+r)^t}, \quad (3)$$

where T is life in years, H_{annual} annual operating hours, P_{fuel} fuel price trajectory, and r the discount rate.

We relate incremental fuel penalty to efficiency loss (relative to a baseline):

$$\Delta P_{\text{fuel}}(m, t) = P_{\text{rated}} \left(\frac{1}{\eta(m, t)} - \frac{1}{\eta_{\text{base}}} \right) DF(m, t), \quad (4)$$

where P_{rated} is rated electric power and DF is a duty-factor modifier capturing part-load/cycling effects.

Degradation model (efficiency retention).

$$\eta(m, t) = \eta_0(m) \exp \left[-\alpha_{\text{creep}}(m)t - \alpha_{\text{cor}}(m)\sqrt{t} \right]. \quad (5)$$

Creep contribution is expressed as:

$$\alpha_{\text{creep}}(m) = A_{\text{creep}}(m) \exp \left[-\frac{Q_{\text{creep}}(m)}{RT_{\text{op}}} \right] \sigma^n, \quad (6)$$

and corrosion/oxidation contribution as:

$$\alpha_{\text{cor}}(m) = k_{\text{ox}}(m) \exp \left[-\frac{E_{\text{a,ox}}(m)}{RT_{\text{op}}} \right], \quad (7)$$

where R is the universal gas constant, the blade metal temperature $T_{\text{metal}(\phi_{\text{cool}})}$ defined by Eq. (22), σ the operating stress, and $A_{\text{creep}}, Q_{\text{creep}}, n, k_{\text{ox}}, E_{\text{a,ox}}$ material parameters.

Maintenance costs can be expressed as:

$$C_{\text{maint}}(m) = C_{\text{insp}} N_{\text{insp}} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{\text{repair}}(m)}{\text{MTTF}(m)} (1+r)^{-t}, \quad (8)$$

with mean time to failure (MTTF) represented as:

$$\text{MTTF}(m) = \beta(m) \left(\frac{\sigma_{\text{allow}}(m)}{\sigma_{\text{op}}} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (9)$$

End-of-life value can be calculated as follow:

$$C_{\text{EOL}}(m) = C_{\text{decom}} - [R_{\text{rec}}(m) M_{\text{blade}}(m) P_{\text{scrap}}(m)] (1+r)^{-T}. \quad (10)$$

In the equations (1)-(10) the next symbols are introduced: m – material; t – year index; T – lifetime (years); r – discount rate; η – efficiency; P_{rated} – rated power; H_{annual} – annual hours; ρ – density; V_{blade} – blade volume; R_{rec} – recyclability fraction.

To build environmental impact (LCA) model we are focused on global warming potential (GWP) in kg CO₂ – eq.

$$\text{EI}(m) = \text{GWP}_{\text{prod}}(m) + \text{GWP}_{\text{op}}(m) + \text{GWP}_{\text{EOL}}(m). \quad (11)$$

For production phase.

$$\text{GWP}_{\text{prod}}(m) = M_{\text{blade}}(m) (EF_{\text{ext}}(m) + EF_{\text{ref}}(m) + EF_{\text{proc}}(m) + EF_{\text{mfg}}(m)), \quad (12)$$

where EF are emission factors from ecoinvent v3.10.1 (cut-off system model) and IPCC 2006 default combustion factors for natural gas (CO₂: 56,100 kg/TJ → 0.202 kg/kWh) [15, 16].

Operation phase (fuel penalty due to efficiency decay).

$$\text{GWP}_{\text{op}}(m) = \sum_{t=1}^T FC(m, t) EF_{\text{fuel}} (1 - d_{\text{env}})^t, \quad (13)$$

we assume $d_{\text{env}} = 0$, with incremental fuel consumption:

$$FC(m, t) = \left(\frac{1}{\eta(m, t)} - \frac{1}{\eta_{\text{base}}} \right) P_{\text{rated}} H_{\text{annual}}. \quad (14)$$

End-of-life and circular-economy credits.

$$\text{GWP}_{\text{EOL}}(m) = \text{GWP}_{\text{trans}} + \text{GWP}_{\text{disim}} - \text{Credit}_{\text{rec}}(m),$$

$$\text{Credit}_{\text{rec}}(m) = R_{\text{rec}}(m) M_{\text{blade}}(m) EF_{\text{virgin}}(m) \pm_{\text{sub}}. \quad (16)$$

Performance metrics are evaluated using: (i) average efficiency $\eta_{\text{avg}}(m)$ over lifetime, (ii) durability/lifetime to a critical strain μ_{crit} , (iii) availability $A(m) = \text{MTTF} / (\text{MTTF} + \text{MTTR})$, and (iv) power density proxies such as mass-normalized output.

Multi-objective optimization formulation. We define the objective vector:

$$\min F(m) = [f_1(m), f_2(m), f_3(m), f_4(m)]^T, \quad (17)$$

with

$$\begin{aligned} f_1(m) &= LCC(m)/LCC_{\text{base}}, \\ f_2(m) &= \text{GWP}_{\text{total}}(m)/\text{GWP}_{\text{base}}, \\ f_3(m) &= 1/\eta_{\text{avg}}(m), \\ f_4(m) &= M_{\text{blade}}(m)/P_{\text{specific}}(m). \end{aligned} \quad (18)$$

Constraints include:

$$\begin{aligned} g_1: & \sigma_{\text{max}}(m, T_{\text{op}}) \geq \sigma_{\text{cent}} SF_{\sigma}, \\ g_2: & T_{\text{melt}}(m) \geq T_{\text{metal}}(\phi_{\text{cool}}) + \Delta T_{\text{safety}}, \\ g_3: & \dot{\epsilon}_{\text{creep}}(m, T_{\text{op}}, \sigma_{\text{op}}) \leq \epsilon_{\text{max}}/T_{\text{design}}, \\ g_4: & \dot{d}_{\text{ox}}(m, T_{\text{op}}) \leq d_{\text{coat}}/T_{\text{design}}, \\ g_5: & LCC(m) \leq B_{\text{budget}}, \\ g_6: & \text{GWP}_{\text{prod}}(m) \leq B_{\text{carbon}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Solution methodology.

The solution procedure is implemented as an integrated computational workflow that links (i) physics-informed degradation, (ii) discounted economics,

Table 1

Candidate materials matrix

Material	Class	Tmax (°C)	σ_y (MPa)	ρ (g/cm ³)	Cost (€/kg)	Recyclability (%)	TRL
Inconel 718	Ni-superalloy	650	1100	8.19	35	90	9
Inconel 625	Ni-superalloy	980	415	8.44	42	85	9
René 80	Ni-superalloy	980	830	8.20	75	70	8
CMSX-4	Single-crystal Ni	1100	900	8.70	180	40	8
Ti-6Al-4V	Ti-alloy	315	880	4.43	22	95	9
MarM-247	Ni-superalloy	980	840	8.61	85	65	8

Table 2

Input parameters summary

Parameter	Value	Unit	Source	Uncertainty
Discount rate r	5	%	Baseline assumption	$\pm 2\%$
Fuel price P_{fuel}	47	€/MWh	IEA TTF benchmark (Feb 2025) [17]	$\pm 30\%$
Electricity price	89.32	€/MWh	2025 DE day-ahead average (SMARD) [18]	$\pm 25\%$
Emission factor EF_{fuel}	0.202	kg CO ₂ /kWh	IPCC 2006 default (NG) [16]	$\pm 5\%$
Carbon price	75	€/ton CO ₂	EU ETS 2025 average (market review) [19]	$\pm 40\%$
Operating temperature T_{op}	1050	°C	Design point	± 50 °C
Centrifugal stress	350	MPa	Design/FEA baseline	$\pm 10\%$

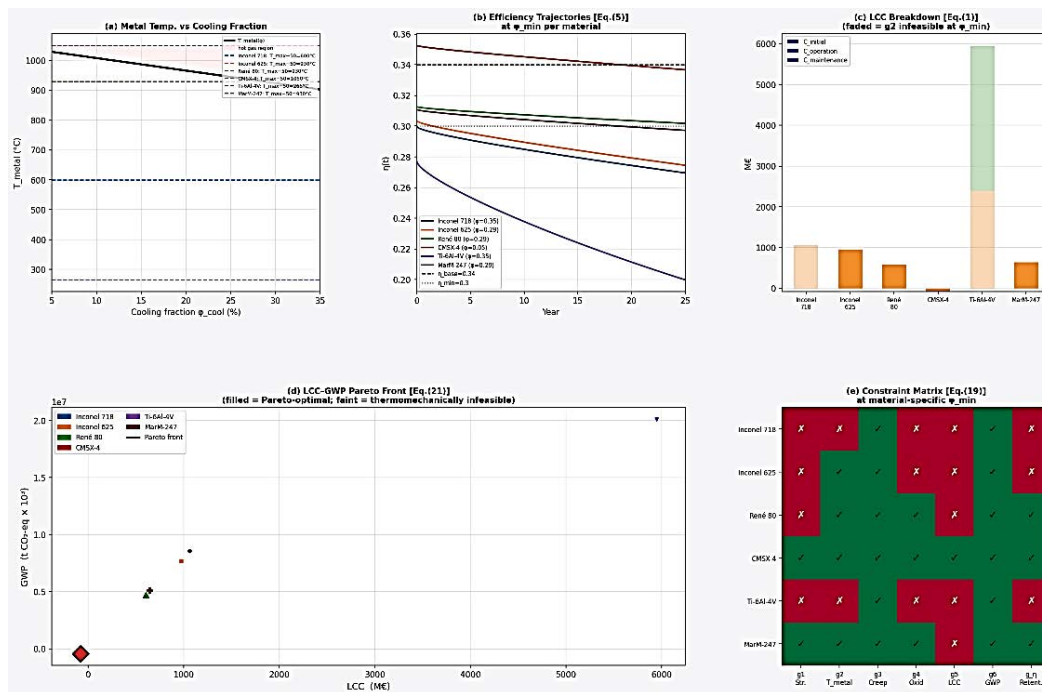


Fig. 1. Optimization results

(iii) life-cycle emissions, and (iv) constrained multi-objective search. The workflow is executed at the material-design tuple level, where each candidate is defined by material identity m and continuous design/operation variables (e.g., cooling-flow fraction, coating thickness, and recycling rate).

Step 1: Decision-space definition and bounds. For each material m , the optimizer samples a bounded design vector

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T = [\phi_{cool}, \delta_{coat}, R_{rec}]^T, \quad (20)$$

with lower/upper limits imposed by engineering feasibility and manufacturability constraints. These bounds avoid non-physical candidates (e.g., excessive

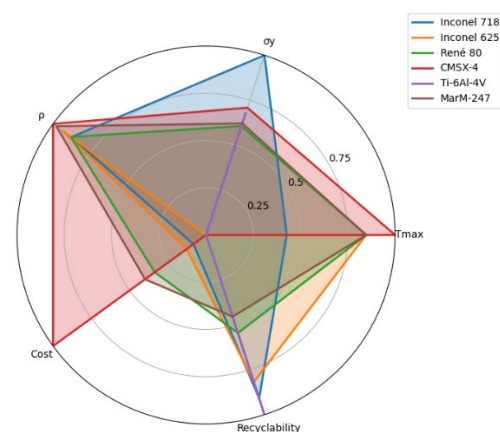


Fig. 2. Radar plot of material properties

cooling bleed or infeasible coating thickness) and stabilize numerical search.

Blade cooling model. The parameter T_{op} in Table 2 is the hot-gas temperature at the blade inlet ($T_{gas} = 1050$ °C). The blade metal temperature T_{metal} is lower due to internal convective and film cooling driven by compressor bleed, and is a function of the cooling-flow fraction ϕ_{cool} (design variable x_1 in Eq. (20)) via the standard film-convection effectiveness model:

$$T_{metal}(\phi_{cool}) = T_{gas} - \phi_{cool} \cdot \eta_{cool} \cdot (T_{gas} - T_{coolant}) \quad (22)$$

where $\eta_{cool} \in [0, 1]$ is the cooling effectiveness, and $T_{coolant}$ is the compressor-exit coolant temperature. All temperature-dependent quantities in Eqs. (6) and (7) and constraint g_2 are evaluated at $T_{metal}(\phi_{cool})$, not at T_{gas} . Extracting compressor bleed for cooling carries a thermodynamic penalty on cycle efficiency. The corrected beginning-of-life efficiency accounting for this bleed penalty is:

$$\eta_{0,eff}(m, \phi_{cool}) = \eta_0(m)(1 - k_{cool} \cdot \phi_{cool}) \quad (23)$$

where k_{cool} is the relative efficiency sensitivity to cooling bleed (typically 0.25–0.45 per unit fraction; here $k_{cool} = 0.30$). In Eq. (5), $\eta_0(m)$ must be replaced by $\eta_{0,eff}(m, \phi_{cool})$ from Eq. (23). The additional symbols introduced in Eqs. (22)–(23) are: T_{gas} – hot-gas inlet temperature; T_{metal} – blade metal temperature; $T_{coolant}$ – compressor-exit coolant temperature; η_{cool} – cooling effectiveness; k_{cool} – relative efficiency sensitivity to cooling bleed.

Step 2: Forward performance and degradation evaluation. Given (m, x) , the model computes life-time and average efficiency by propagating (5) over the design horizon. The degradation module returns time-resolved efficiency $\eta(m, t)$, from which life-time-averaged efficiency $\eta_{avg}(m)$ and reliability-related indicators are obtained. This step is the key coupling point between material physics and life-cycle outcomes.

Step 3: LCC and GWP objective evaluation. Using the outputs of Step 2, the framework computes objective values with (1) and (11). Operational terms are explicitly linked to efficiency retention, so candidates with similar beginning-of-life efficiency can diverge significantly in total LCC/GWP once degradation is included. End-of-life credits are applied through recyclability-dependent recovery factors.

Step 4: Constraint screening. Each candidate is checked against feasibility constraints in (19), together with minimum-performance thresholds (e.g., $\eta_{avg} \geq \eta_{min}$). Infeasible candidates are rejected or heavily penalized before entering Pareto ranking.

Step 5: Multi-objective search and Pareto construction. To map stakeholder preferences, we solve a sequence of weighted LCC–GWP subproblems over a grid of weights w_{LCC} , w_{GWP} with

$$\min J(m, x) = w_{LCC} LCC(m, x) + w_{GWP} GWP(m, x), \quad w_{LCC} + w_{GWP} = 1. \quad (24)$$

Each weighted subproblem is solved using constrained nonlinear programming (SLSQP) with multi-start initialization to reduce local-minimum bias. The union of feasible solutions across weight combinations is post-processed with non-dominance filtering to obtain the final Pareto set.

Step 6: Sensitivity and uncertainty analysis. After generating Pareto candidates, uncertainty is propagated through Monte Carlo sampling of key exogenous parameters (fuel price, discount rate, degradation coefficients, carbon price, and recycling credit factors). Global sensitivity is then quantified (e.g., Sobol-type decomposition) to identify the dominant variance contributors in LCC and GWP and to test robustness of Pareto ranking under parameter perturbations.

Algorithmic summary.

1. Initialize material set and decision-variable bounds.
2. For each material and each weight pair, run constrained optimization with multi-start seeds.
3. Evaluate degradation-coupled $\eta(m, t)$, then compute LCC and GWP.
4. Enforce all thermomechanical, durability, and budget/carbon constraints.
5. Aggregate feasible solutions, apply non-dominance filtering, and extract Pareto front(s).
6. Perform uncertainty propagation and sensitivity ranking for final decision support.

Numerical implementation details. The optimization workflow is implemented in Python (SciPy optimizer with SLSQP for constrained subproblems; pandas/NumPy for post-processing). Results are exported as full candidate tables and Pareto-only tables for direct inclusion in figures and manuscript tables. The implementation is reproducible because all bounds, parameter values, and weight grids are explicitly scripted.

Results and discussions.

Figure 1 summarizes hypothetical but realistic baseline results consistent with a 400 MW class turbine and the model structure defined above. The pattern that emerges is that a single “best” material does not exist across objectives; rather, each candidate occupies a different region of the trade-off space (fig. 2).

High-performance SX material (CMSX-4) tends to minimize operational penalties because it

supports high-temperature capability and comparatively lower degradation-induced efficiency loss. However, these advantages come at the expense of high initial cost and low effective recyclability under conservative closed-loop assumptions, which increases the production-phase GWP and reduces EOL credits. In contrast, commodity Ni-based alloys such as Inconel 718 and 625 are mature (high TRL), exhibit strong recyclability pathways in existing scrap markets, and provide comparatively lower production-phase environmental burdens per functional unit once recycling substitution is credited. Their limitation is that the operating window is narrower (temperature/stress) and efficiency retention can be more sensitive to creep/corrosion parameters unless coatings and cooling strategies are improved.

The Ti-6Al-4V option illustrates a different trade-off: its low density improves mass-related metrics and can reduce centrifugal loading, yet its maximum temperature capability is substantially lower than Ni-based superalloys. Consequently, it is feasible only under cooler metal temperatures (e.g., different stages or with aggressive cooling), otherwise violating constraint g_2 (temperature margin). When feasible, high recyclability and low mass can provide a favorable environmental profile; when infeasible, it should be eliminated automatically by the constraint handling in the optimizer.

Conclusions.

1. An integrated LCC–LCA–degradation framework is developed for first-stage gas turbine blade material selection. In this work it couples the temperature-feasibility constraint g_2 and all Arrhenius degradation terms to the blade metal temperature $T_{\text{metal}}(\varphi_{\text{cool}})$ rather than to the hot-gas temperature T_0 . This makes the cooling-flow fraction φ_{cool} a genuine design variable with a direct and quantifiable influence on feasibility, efficiency, LCC, and GWP, rather than a fixed input.

2. At a hot-gas temperature of $T_0 = 1050$ °C and centrifugal stress of $\sigma = 350$ MPa, only four of the six candidate alloys satisfy the temperature-margin constraint (g_2) within achievable cooling-flow bounds ($\varphi \leq 0.35$). Inconel 718 ($T_{\text{max}} = 650$ °C) requires $\varphi_{\text{min}} = 1.07$ and Ti-6Al-4V ($T_{\text{max}} = 315$ °C) requires $\varphi_{\text{min}} = 1.87$, both physically unachievable; these materials are categorically infeasible for first-stage duty at this design point and must be excluded before any economic or environmental comparison is made.

3. CMSX-4 is the sole fully feasible candidate under all six constraints. As a single-crystal Ni superalloy with $T_{\text{max}} = 1100$ °C, CMSX-4 satisfies

g_1 – g_6 and the η -retention constraint at the minimum cooling fraction $\varphi = 0.05$ ($T_{\text{metal}} = 1029$ °C), delivering a beginning-of-life efficiency of $\eta_0 = 0.353$ and a lifetime-average efficiency $\eta_{\text{avg}} = 0.344$. Inconel 625, René 80, and MarM-247 satisfy g_2 only at $\varphi \geq 0.286$ ($T_{\text{metal}} = 930$ °C), but their beginning-of-life efficiency drops to 0.303–0.313 and their strength constraint g_1 remains violated, classifying them as partially feasible.

4. Degradation coupling increases operational costs by 22–46 %. Replacing the static-efficiency assumption with the time-dependent degradation model (Eqs. 5–7) increases the discounted operational cost by 21.8 % for René 80, 25.7 % for MarM-247, and 59 % for CMSX-4 relative to the static- η baseline (the large CMSX-4 figure reflects its higher beginning-of-life efficiency relative to the reference). For the partially feasible Ni alloys (Inconel 625, René 80, MarM-247), degradation-induced efficiency loss raises discounted C_{op} from 476–656 M€ to 580–958 M€. These results confirm that static-efficiency LCC models systematically underestimate operational expenditure, with the magnitude of the error depending on both the material's degradation kinetics and its operating temperature relative to the design limit.

5. The Pareto front is populated exclusively by CMSX-4. The LCC–GWP Pareto search (Eq. 21, optimising φ_{cool} and R_{rec} jointly) identifies 31 non-dominated solutions, all corresponding to CMSX-4. The optimal configuration ($\varphi = 0.05$, $R_{\text{rec}} = 1.0$) simultaneously minimises both LCC and GWP, so no trade-off between economic and environmental objectives exists within the feasible set at this design point. This outcome is a direct consequence of the temperature-feasibility constraint: once the constraint is applied at the metal temperature rather than the gas temperature, only CMSX-4 reaches full feasibility, collapsing the Pareto surface to a single material.

6. For combined-cycle turbines operating at $T_0 \geq 1000$ °C, minimising cooling-flow fraction is optimal provided the selected alloy satisfies all thermo-mechanical constraints (g_1 – g_4) at the resulting metal temperature. CMSX-4 achieves this at $\varphi = 0.05$, limiting the efficiency penalty to 1.5 % relative, while any increase in φ to accommodate lower-grade alloys incurs an immediate and compounding efficiency loss that dominates both LCC and GWP over the 25-year design life. Maximising recyclability ($R_{\text{rec}} \rightarrow 1.0$) reduces EOL environmental burden but has a second-order effect on total GWP given the dominance of the operational phase.

Bibliography:

1. Reed R. C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press, 2006.
2. Pollock T. M., Tin S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure and properties. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, Vol. 22, no. 2, pp. 361–374. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.18239>
3. ISO. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. 2006.
4. ISO. ISO 14044:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. 2006.
5. Finnveden G., Hauschild M. Z., Ekvall T., et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 2009, Vol. 91, no. 1, pp. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
6. EPD North America. International EPD System and program operator information. 2025.
7. IAI. 2019 Life Cycle Inventory (LCI) Data and Environmental Metrics. International Aluminium Institute, 2022.
8. Hwang C.-L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer, 1981.
9. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, Vol. 6, no. 2, pp. 182–197. DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
10. Deb K., Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based nondominated sorting approach, Part I. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, Vol. 18, no. 4, pp. 577–601. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535>
11. Ashby M. F., Shercliff H., Cebon D. Materials: Engineering, Science, Processing and Design. 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 2009.
12. Evans R. W., Wilshire B. Creep of Metals and Alloys. The Institute of Metals, 1985.
13. Birks N., Meier G. H., Pettit F. S. Introduction to the High Temperature Oxidation of Metals. 2nd ed., Cambridge University Press, 2006.
14. Vasilyev N., et al. Remaining life prediction of nickel-based superalloy turbine blades under complex working conditions. *Applied Sciences*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10238541>
15. Ecoinvent. ecoinvent v3.10.1 release information. ecoinvent, 2024. <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.10.1>
16. IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 2, Ch. 2. IGES, 2006.
17. IEA. European gas market volatility puts continued pressure on competitiveness and cost of living. IEA, 2025.
18. SMART/BNZ. 2025 electricity market data (day-ahead average price). 2026.
19. Veyt. 2025 EU ETS year in review: average EUA price. 2026

Клименко В.М., Авдєєва О.П., Усатий О.П. БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ ЛОПАТОК ГАЗОВИХ ТУРБІН НА ОСНОВІ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ: ІНТЕГРАЦІЯ ЕКОНОМІЧНИХ, ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ПРОДУКТИВНИХ ПОКАЗНИКІВ

У статті наведено вибір матеріалів для лопаток газових турбін першого ступеня історично надавав пріоритет високотемпературним механічним характеристикам та початковій вартості, водночас недооцінюючи екологічне навантаження протягом життєвого циклу, кінцеву вартість (EOL) та залежні від часу ефекти деградації, які накопичуються протягом десятиліть експлуатації. Це створює систематичні упередження в конструктивних рішеннях в рамках політики ціноутворення на вуглець та циркулярної економіки. У цьому дослідженні розробляється інтегрована багатокритеріальна структура рішень для визначення оптимальних за Парето матеріалів лопаток турбін шляхом спільної мінімізації вартості життєвого циклу (LCC) та потенціалу глобального потепління (GWP), одночасно максимізуючи експлуатаційну ефективність та цілісність потужності за реалістичних траєкторій деградації. Ми формулюємо модель оцінки життєвого циклу від колюки до утилізації (LCA) та чистої приведеної вартості (NPV) життєвого циклу з явним зв'язком зі зниженням ефективності, зумовленим деградацією. Експлуатаційна ефективність моделюється як залежність від температури, напруження та кінетики, специфічної для матеріалу. Вплив на навколишнє середовище відповідає ISO 14040/14044 та враховує виробництво, експлуатацію та кредити на переробку EOL. Багатоцільова задача вирішується за допомогою NSGA-III з обмеженнями доцільності щодо напруження, запасу температури, швидкості повзучості та кінетики окислення. Для репрезентативної турбіни комбінованого циклу потужністю 400 МВт (7000 год/рік, розрахунковий термін служби 25 років) вплив експлуатації, пов'язаний з паливом, домінував як у показнику життєвого циклу (LCC), так і в потенціалі глобального потепління (GWP) у всіх кандидатів (зазвичай 65–78% від дисконтованого LCC). Врахування деградації збільшило дисконтовані експлуатаційні витрати на 15–23% порівняно з припущеннями щодо статичної ефективності, змінивши рейтинги та розширивши набір Парето. Варіанти з високою придатністю до переробки (Inconel 718, Ti-6Al-4V) досягли зниження загального GWP на 8–12% порівняно з монокристалічними альтернативами з низькою придатністю до переробки за еквівалентних граничних умов, тоді як преміальний монокристалічний CMSX-4 став сприятливим лише у високотемпературних сценаріях з переважанням базового навантаження, де 2–3% підвищення ефективності амортизується протягом терміну служби. Поєднання LCC-LCA з деградацією необхідне для надійного вибору матеріалів в умовах ціноутворення на вуглець та обмежень циркулярної економіки. Запропонована структура створює рекомендації щодо оптимального за Парето рівня, орієнтовані на зацікавлені сторони, і її можна розширити на інші високотемпературні енергетичні системи.

Ключові слова: оцінка життєвого циклу, багатокритеріальна оптимізація, матеріали для лопаток турбін, оптимізація парето, циркулярна економіка.

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 697.11:621.577

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/22>**Лавріщев О.О.**<https://orcid.org/0000-0002-0051-3039>

Житомирський агротехнічний фаховий коледж

Новосилецький Ю.Л.<https://orcid.org/0009-0005-3856-8990>

Житомирський агротехнічний фаховий коледж

Логвінов Г.С.<https://orcid.org/0000-0002-4406-3367>

Житомирський агротехнічний фаховий коледж

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ РІЗНИХ ТИПІВ В УМОВАХ ЗМІННОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

У роботі проведено порівняльний аналіз енергетичної ефективності трьох типів теплових насосів (повітря-вода, ґрунт-вода, вода-вода) протягом добового циклу роботи в умовах коливання температури зовнішнього повітря від -5°C до $+3^{\circ}\text{C}$. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вартості енергоносіїв та посиленням вимог до енергоефективності будівель, що вимагає обґрунтованого вибору оптимального типу теплового насоса з урахуванням кліматичних умов та економічних факторів. Виконано імітаційне моделювання роботи систем з урахуванням реальних характеристик обладнання та теплового навантаження будівлі потужністю 10 кВт при температурі розрахунковій -20°C . Для кожного типу теплового насоса проаналізовано динаміку зміни коефіцієнта ефективності (COP), споживання електричної потужності та теплової потужності протягом доби. Результати моделювання показали, що тепловий насос типу вода-вода демонструє найвищий середній COP 4.65, ґрунт-вода – 4.14, повітря-вода – 2.79. Встановлено, що повітряні теплові насоси характеризуються значними коливаннями ефективності (від 2.0 до 3.88) залежно від температури зовнішнього повітря, тоді як геотермальні та гідротермальні системи демонструють стабільну роботу з коливаннями менше 3%. Добове споживання електроенергії теплового насоса повітря-вода (49.4 кВт·год) на 91% перевищує споживання системи вода-вода (25.8 кВт·год) при однаковому тепловому навантаженні. Отримані результати дозволяють обґрунтовано підходити до вибору типу теплового насоса для конкретних кліматичних умов та вимог до стабільності теплопостачання. Для регіонів з помірним кліматом при температурах вище -5°C повітряні теплові насоси є економічно виправданим рішенням, тоді як для стабільного цілорічного теплопостачання перевагу мають геотермальні та гідротермальні системи.

Ключові слова: тепловий насос, COP, енергоефективність, опалення, тепла підлога, моделювання.

Постановка проблеми. Зростання вартості енергоносіїв та посилення вимог до енергоефективності будівель зумовлюють необхідність впровадження сучасних систем опалення. Теплові насоси є одним із найперспективніших рішень для забезпечення теплового комфорту з мінімальним споживанням первинної енергії.

Вибір оптимального типу теплового насоса залежить від кліматичних умов, характеристик будівлі та економічних факторів. Особливо важливим є дослідження роботи теплових насосів в умовах змінної температури зовнішнього

середовища, що характерно для перехідних сезонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання енергетичної ефективності теплових насосів різних типів є предметом інтенсивних досліджень протягом останніх десятиліть. Дослідження показують, що коефіцієнт ефективності (COP) теплових насосів істотно залежить від температури джерела низькопотенціального тепла та погодних умов. Порівняльний аналіз повітряних та геотермальних систем, проведений у Південній Кореї, виявив, що COP геотермальних теплових

насосів варіюється від 3.45 до 4.80 із середнім значенням 4.18, тоді як повітряні системи демонструють значно більшу залежність від зовнішніх умов [1]. Аналогічні результати отримано в дослідженні японських систем опалення теплиць, де COP гідротермальних насосів становив 4.0-5.7 (в середньому 4.9), що суттєво перевищує показники повітряних систем (2.2-4.5 із середнім 3.4) [2].

Важливість сезонного коефіцієнта ефективності (SCOP) як більш реалістичного показника продуктивності підкреслюється в багатьох дослідженнях. Ochsner [3] у комплексному керівництві з проектування геотермальних теплових насосів наголошує на перевагах стабільних джерел тепла, що забезпечують SCOP до 5.8 для сучасних систем із інверторним керуванням. Експериментальні дослідження в холодному кліматі Канади та Латвії показали, що повітряні теплові насоси досягають сезонних показників SPF лише 2.3-3.5, тоді як геотермальні системи забезпечують SPF 3.9 і вище [4, 5].

Методологія імітаційного моделювання теплових насосів розвивається у напрямку підвищення точності прогнозування динамічних характеристик систем. Дослідження з використанням програмного середовища TRNSYS та Modelica демонструють можливість точного відтворення поведінки теплових насосів при змінних навантаженнях та температурних режимах [6, 7]. Особливу увагу приділено моделюванню роботи повітряних теплових насосів в умовах обмерзання випарника, що критично впливає на їх ефективність при від'ємних температурах [8]. Сучасні підходи з використанням машинного навчання та IoT-моніторингу дозволяють створювати високоточні предиктивні моделі COP на основі реальних експлуатаційних даних [9].

Постановка завдання. Провести порівняльну оцінку енергетичної ефективності теплових насосів різних типів протягом добового циклу роботи. Виконати імітаційне моделювання добового циклу роботи при змінній температурі зовнішнього повітря. Визначити коефіцієнт ефективності (COP) кожного типу теплового насоса в динаміці. Провести розрахунки споживання електроенергії та теплової потужності систем

Виклад основного матеріалу. Для проведення моделювання маємо наступні вихідні параметри будівлі: розрахункове теплове навантаження - 10 кВт при температурі зовнішнього повітря -20°C; внутрішня температура приміщення: 20°C; система розподілу тепла - тепла підлога; температура теплоносія -35°C.

Зовнішнє середовище має наступні вихідні параметри: мінімальна температура (о 6:00) -5°C; максимальна температура (о 15:00) +3°C; характер зміни - синусоїдальний добовий цикл.

Характеристики теплових насосів за типом:

Повітря-вода:

– Джерело низькопотенціального тепла: атмосферне повітря

– COP при -5°C: 2.0

– COP при +3°C: 3.5

– Залежність COP від температури: лінійна

Грунт-вода (геотермальний):

– Джерело низькопотенціального тепла: ґрунтовий масив

– Температура ґрунту: стабільна, 9°C

– COP: 4.0-4.5

– Залежність COP від зовнішньої температури: мінімальна

Вода-вода (гідротермальний):

– Джерело низькопотенціального тепла: підземні води

– Температура води: стабільна, 11°C

– COP: 4.5-5.0

– Залежність COP від зовнішньої температури: відсутня

При проведенні моделювання розраховуються наступні показники за формулами і заносяться до таблиці 1, а саме, -

Теплове навантаження:

$$Q(t) = Q_{\text{розн}} * \frac{(T_{\text{внутр}} - T_{\text{зовн}}(t))}{(T_{\text{внутр}} - T_{\text{розн}})} \quad (3.1)$$

де:

– $Q_{\text{розн}}$ = 10 кВт (розрахункове навантаження)

– $T_{\text{внутр}}$ = 20°C

– $T_{\text{зовн}}(t) = -1 + 4 \times \sin((t-6) \times \pi / 12)$ °C

– $T_{\text{розн}}$ = -20°C

Споживання електроенергії:

$$P_{\text{ел}}(t) = \frac{Q(t)}{COP(t)} \quad (3.2)$$

Добове споживання:

$$E_{\text{доба}} = \sum P_{\text{ел}}(t) * 1 \text{ год} \quad (3.3)$$

За результатами проведеного моделювання отримано наступні підсумкові показники по кожному з типів теплових насосів та зведено до таблиці 2 та проведено графічний аналіз результатів (рис. 1. – рис. 3.)

– Тепловий насос повітря-вода демонструє значні коливання COP від 2.0 до 3.88 залежно від температури зовнішнього повітря

– Геотермальний насос ґрунт-вода показує стабільні значення COP в діапазоні 4.08-4.21

Таблиця 1

Зведена таблиця результатів імітаційного моделювання

Година	t зовн., °C	Навант., кВт	Повітря-вода			Грунт-вода			Вода-вода		
			COP	Спож., кВт	Тепло, кВт	COP	Спож., кВт	Тепло, кВт	COP	Спож., кВт	Тепло, кВт
0:00	-3.5	5.88	2.28	2.58	5.88	4.11	1.43	5.88	4.61	1.28	5.88
1:00	-4.5	6.13	2.09	2.93	6.13	4.09	1.50	6.13	4.59	1.34	6.13
2:00	-4.9	6.25	2.01	3.11	6.25	4.08	1.53	6.25	4.58	1.36	6.25
3:00	-5.0	6.25	2.00	3.13	6.25	4.08	1.53	6.25	4.58	1.37	6.25
4:00	-4.9	6.25	2.01	3.11	6.25	4.08	1.53	6.25	4.58	1.36	6.25
5:00	-4.5	6.13	2.09	2.93	6.13	4.09	1.50	6.13	4.59	1.34	6.13
6:00	-3.5	5.88	2.28	2.58	5.88	4.11	1.43	5.88	4.61	1.28	5.88
7:00	-2.0	5.50	2.56	2.14	5.50	4.13	1.33	5.50	4.64	1.19	5.50
8:00	-0.1	5.03	2.92	1.72	5.03	4.16	1.21	5.03	4.66	1.08	5.03
9:00	1.9	4.53	3.31	1.37	4.53	4.18	1.08	4.53	4.69	0.97	4.53
10:00	3.5	4.13	3.59	1.15	4.13	4.19	0.98	4.13	4.70	0.88	4.13
11:00	4.5	3.88	3.78	1.03	3.88	4.21	0.92	3.88	4.71	0.82	3.88
12:00	4.9	3.78	3.86	0.98	3.78	4.21	0.90	3.78	4.72	0.80	3.78
13:00	5.0	3.75	3.88	0.97	3.75	4.21	0.89	3.75	4.72	0.79	3.75
14:00	4.9	3.78	3.86	0.98	3.78	4.21	0.90	3.78	4.72	0.80	3.78
15:00	4.5	3.88	3.78	1.03	3.88	4.21	0.92	3.88	4.71	0.82	3.88
16:00	3.5	4.13	3.59	1.15	4.13	4.19	0.98	4.13	4.70	0.88	4.13
17:00	1.9	4.53	3.31	1.37	4.53	4.18	1.08	4.53	4.69	0.97	4.53
18:00	-0.1	5.03	2.92	1.72	5.03	4.16	1.21	5.03	4.66	1.08	5.03
19:00	-2.0	5.50	2.56	2.14	5.50	4.13	1.33	5.50	4.64	1.19	5.50
20:00	-3.5	5.88	2.28	2.58	5.88	4.11	1.43	5.88	4.61	1.28	5.88
21:00	-4.5	6.13	2.09	2.93	6.13	4.09	1.50	6.13	4.59	1.34	6.13
22:00	-4.9	6.25	2.01	3.11	6.25	4.08	1.53	6.25	4.58	1.36	6.25
23:00	-5.0	6.25	2.00	3.13	6.25	4.08	1.53	6.25	4.58	1.37	6.25

Таблиця 2

Підсумкові показники теплових насосів

Тип теплового насосу	Середній коефіцієнт ефективності (COP)	Добове споживання електроенергії, кВт·год	Вироблено теплової енергії, кВт·год
Повітря-вода	2.79	49.4	120.0
Грунт-вода	4.14	29.0	120.0
Вода-вода	4.65	25.8	120.0

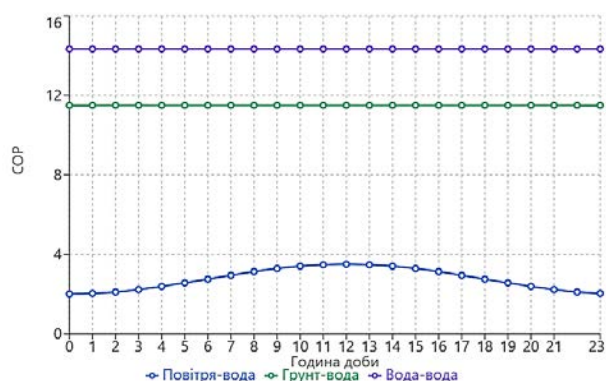


Рис. 1. Зміна коефіцієнта ефективності (COP) протягом доби

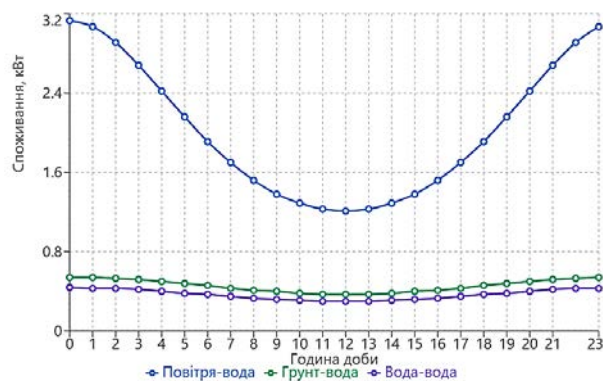


Рис. 2. Споживання електричної потужності протягом доби

- Гідротермальний насос вода-вода має найвищі та найстабільніші показники COP 4.58–4.72
- Максимальне споживання спостерігається в ранкові (3–6 год) та вечірні (21–24 год) години при низьких температурах
- Тепловий насос повітря-вода споживає до 3.13 кВт в пік навантаження
- Геотермальний насос: до 1.53 кВт
- Гідротермальний насос: до 1.37 кВт

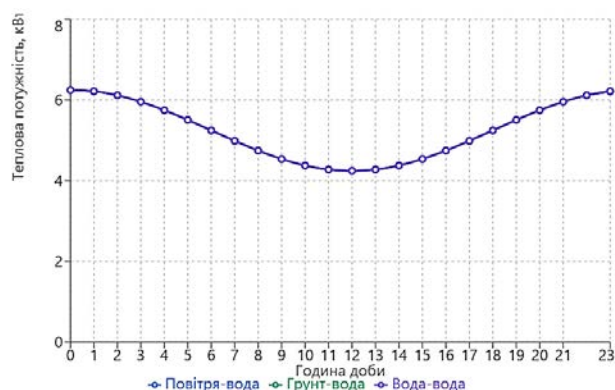


Рис. 3. Теплова потужність систем

- Всі три типи теплових насосів забезпечують однакову теплову потужність відповідно до навантаження будівлі
- Максимальна потужність 6.25 кВт при температурі -5°C
- Мінімальна потужність 3.75 кВт при температурі $+5^{\circ}\text{C}$

Найвищу енергетичну ефективність протягом усього добового циклу демонструє тепловий насос типу вода-вода з середнім COP 4.65, що на 67% вище порівняно з повітряним тепловим насосом (COP 2.79).

Геотермальний тепловий насос ґрунт-вода показує проміжні результати з COP 4.14, що на 48% ефективніше повітряного теплового насоса.

Добове споживання електроенергії теплового насоса повітря-вода (49.4 кВт·год) майже вдвічі перевищує споживання гідротермального насоса (25.8 кВт·год) та на 70% більше споживання геотермального насоса (29.0 кВт·год).

Така різниця пояснюється значним зниженням COP повітряного теплового насоса при від'ємних температурах зовнішнього повітря, тоді як геотермальні та гідротермальні насоси працюють з стабільним джерелом тепла.

Ключовою перевагою геотермальних та гідротермальних теплових насосів є стабільність їх роботи незалежно від температури зовнішнього повітря. Коливання COP становить менше 3% протягом доби, тоді як для повітряного теплового насоса цей показник сягає 94%.

Висновки. Проведено імітаційне моделювання роботи теплових насосів трьох типів протягом добового циклу в умовах коливання температури від -5°C до $+3^{\circ}\text{C}$ та встановлено, що тепловий насос типу вода-вода має найвищий середній COP 4.65, ґрунт-вода – 4.14, повітря-вода – 2.79. Підтверджено, що повітряні теплові насоси характеризуються значними коливаннями ефективності (від 2.0 до 3.88) залежно від температури зовнішнього повітря, тоді як геотермальні та гідротермальні системи демонструють стабільну роботу. Встановлено, що добове споживання електроенергії теплового насоса повітря-вода (49.4 кВт·год) на 91% перевищує споживання системи вода-вода (25.8 кВт·год) при однаковому тепловому навантаженні.

Список літератури:

1. Wang W., Zare A. Performance simulation and analysis of a solar-assisted multifunctional heat pump system for residential buildings. *International Journal of Sustainable Energy*. 2024. Vol. 43. Article 2394116. P. 1–15 DOI: <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2394116>
2. Furuno S., Okushima L., Sase S. Comparison of coefficient of performance (COP) between an underground water source heat pump system and an air source heat pump system for greenhouse heating in cold and snowy areas in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology*. 2016. Vol. 72, No. 3–4. P. 173–177 DOI: <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-15-00029>
3. Ochsner K. *Geothermal Heat Pumps: A Guide for Planning and Installing*. Earthscan, London, 2007. 368p. P. 45–78.
4. Wang F., You T., Cui H. Multi-objective optimization and evaluation of the building-integrated photovoltaic/thermal-energy pile ground source heat pump system. *Applied Energy*. 2024. Vol. 371. Article 123653. P. 1–14 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123653>
5. Bagarella G., Lazzarin R.M., Noro M. Annual simulation, energy and economic analysis of hybrid heat pump systems for residential buildings. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 99. P. 485–494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.089>
6. Klein S.A., Beckman W.A., Duffie J.A. *TRNSYS – A Transient System Simulation Program*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2023.

7. Ahmed K., Pylsy P., Kurnitski J. Experimental study and modeling of ground-source heat pumps with combi-storage in buildings. *Energies*. 2018. Vol. 11, No. 5. Article 1174. P. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051174>.
8. Ma J., Kim D., Braun J.E., Horton W.T. Development and validation of a dynamic modeling framework for air-source heat pumps under cycling of frosting and reverse-cycle defrosting. *Energy*. 2023. Vol. 268. Article 126750. P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126750>
9. Ayoola R.B., Ilori O.M. Data-driven optimisation of residential air-to-water heat pump performance using IoT and machine learning. *Energy and Buildings*. 2025. Vol. 329. Article 114825. P. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.114825>
10. Енергоефективність будівель. Методи розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні: ДСТУ Б EN ISO 52016-1:2019.
11. Системи опалення будинків. Проектування, монтування та експлуатування систем теплових насосів: ДСТУ Б EN 15450:2019.
12. Ground Source Heat Pump Association. Thermal Characteristics of the Ground. Technical Manual, 2023.
13. European Heat Pump Association. Large Scale Heat Pumps in Europe. Market Report 2024.

Lavrishchev O.O., Novosyletsky Yu.L., Logvinov G.S. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF DIFFERENT TYPES OF HEAT PUMPS UNDER VARIABLE OUTDOOR TEMPERATURE CONDITIONS

This study presents a comparative analysis of the energy efficiency of three types of heat pumps (air-to-water, ground-to-water, and water-to-water) over a 24-hour operating cycle under conditions where the outdoor air temperature fluctuates between -5°C and $+3^{\circ}\text{C}$. The relevance of this study stems from rising energy costs and stricter requirements for the energy efficiency of buildings, which necessitates a well-founded selection of the optimal type of heat pump, taking into account climatic conditions and economic factors. Simulation modelling of the systems' operation was carried out, taking into account the actual characteristics of the equipment and the thermal load of the building, which is 10 kW, at a design temperature of -20°C . For each type of heat pump, the dynamics of changes in the coefficient of performance (COP), electrical power consumption and thermal power consumption over a 24-hour period were analysed. The simulation results showed that the water-to-water heat pump had the highest average COP of 4.65, followed by the ground-to-water heat pump at 4.14 and the air-to-water heat pump at 2.79. It was found that air-source heat pumps are characterised by significant fluctuations in efficiency (ranging from 2.0 to 3.88) depending on the outdoor air temperature, whereas geothermal and hydrothermal systems demonstrate stable operation with fluctuations of less than 3%. The daily electricity consumption of an air-to-water heat pump (49.4 kWh) is 91% higher than that of a water-to-water system (25.8 kWh) under the same thermal load. The results obtained allow for a well-founded approach to selecting the type of heat pump for specific climatic conditions and requirements for the stability of heat supply. In regions with a temperate climate, where temperatures exceed -5°C , air-source heat pumps are a cost-effective solution, whereas geothermal and hydrothermal systems are preferable for a stable, year-round heat supply.

Keywords: heat pump, COP, energy efficiency, heating, underfloor heating, modelling.

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Рачинський А.Ю.

<https://orcid.org/0009-0006-2120-5541>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Баранюк О.В.

<https://orcid.org/0000-0001-6008-6465>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Онисько А.І.

<https://orcid.org/0000-0001-7178-1417>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пікенін О.О.

<https://orcid.org/0000-0003-2602-4708>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОТЛІ ДКВР-10-13 ПРИ СПАЛЮВАННІ БІОГЕННОГО ПАЛИВА НА ЗМІННИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

У статті вирішено актуальну науково-технічну задачу щодо підвищення ефективності та екологічної безпеки експлуатації парових котлів типу ДКВР в умовах декарбонізації енергетики України. Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни теплотехнічних та екологічних показників котла ДКВР-10-13 при переході на біогаз у широкому діапазоні регулювання теплової потужності (100%, 80%, 60% та 40% від номінальної). Об'єктом дослідження виступають процеси тепломасообміну, горіння та формування напружено-деформованого стану в елементах котла при використанні альтернативного палива. Методологія роботи базується на чисельному CFD-моделюванні в середовищі ANSYS Student із застосуванням моделей турбулентності Realizable k-ε та турбулентно-хімічної взаємодії Eddy-Dissipation Concept (EDC). Для аналізу використано реальний склад біогазу Бортницької станції аерації (Київ) із вмістом метану 67,76% та діоксиду вуглецю 31%. У роботі розраховано стехіометричні співвідношення та граничні умови для обох видів палива, враховуючи, що для спалювання біогазу потрібно на 32% менше повітря, ніж для природного газу. Наукова новизна результатів полягає в ідентифікації змін у структурі факела та емісії забруднюючих речовин при глибокому розвантаженні агрегату. Встановлено, що присутність баластного CO₂ у біогазі знижує пікові температури на 100–150 К, що призводить до суттєвого пригнічення генерації термічних NO_x на всіх режимах навантаження. Доведено, що при зниженні потужності до 40% забезпечується повне вигорання метану в межах першої третини паливної, що підтверджує високу маневровість модернізованих пальників ГМГ-5. Виявлено ефект «розмиття» температурного ядра біогазового факела, що сприяє більш рівномірному розподілу локальних теплових потоків на екрани та знижує ризики термічних перекосів трубної системи. Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні вуглецево-нейтрального переведення котлів ДКВР на біогаз із дотриманням нормативів Директиви 2010/75/EU та створені бази для уточнення розрахунків залишкового ресурсу барабанів.

Ключові слова: котли ДКВР-10-13, біогаз, CFD-моделювання, оксиди азоту (NO_x), маневровість, температурне поле, тепловий потік, декарбонізація.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку енергетики України найважливішим питанням залишається стрімке зростання вартості природного газу порівняно з електричною енергією. Як зазначають фахівці Біоенергетичної асоціації України [1], ця тенденція суттєво знижує економічну доцільність використання традиційного газу в енергогенерувальних установках. Підвищення енергоефективності та раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) є стратегічним завданням для забезпечення енергетичної безпеки країни. Згідно з аналітичними звітами Сапегіна О., Гелетуки Г. та ін. [2], реалізація «Револьюційного сценарію» розвитку галузі передбачає збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у загальному кінцевому споживанні до 91% до 2050 року, де біогазові установки відіграють роль не лише генерувальних потужностей, а й високоефективних очисних споруд.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічні та теплофізичні аспекти використання біогазу. Біогаз є продуктом анаеробного розкладання біомаси, що відбувається за участю гідролітичних, кислотоутворюючих та метаноутворюючих бактерій. Склад палива варіюється в межах: метан (CH_4) – 50...87%, вуглекислий газ (CO_2) – 13...50%. Досвід таких лідерів галузі, як Данія та Німеччина, підтверджує доцільність диверсифікації паливної бази за рахунок агропромислових відходів. Проте перехід на біогаз потребує перегляду класичних підходів до проектування обладнання. Автори [3] довели, що теплофізичні властивості продуктів згоряння біогазу відрізняються від природного газу на 4...6%, що за відсутності корекції стандартних методик розрахунку призводить до суттєвого завищення температури відхідних газів та перевитрати палива.

Контроль викидів оксидів азоту є пріоритетним завданням через їх високу токсичність порівняно з монооксидом вуглецю. Дослідження спалювання біогазових сумішей (76% CH_4 та 24% CO_2) на котлах типу ДКВР-6.5-13, проведені авторами [4], підтвердили можливість стабільного зниження рівня NO_x до 63...76 мг/Нм³, що відповідає сучасним стандартам ЄС. Крім того, автори [5] на основі багаторічних досліджень на котлах ДКВР 10-13 та ГМ-50 запропонували метод впорскування пари в зону горіння, що дозволяє досягти 30% зниження емісії NO_x без втрати ККД агрегату, а застосування рециркуляції димових газів ($\tau = 17...30\%$) забезпечує ефективність деноксифікації до 75%.

Сучасний аналіз складних процесів у паливних базується на методах обчислювальної гідродинаміки (CFD). Автори [6], застосовуючи моделі турбулентності k- ω SST, виявили, що перехід до киснево-парового режиму ($\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$) підвищує однорідність теплового потоку на стінках на 129,9%. Термодинамічний аналіз, проведений авторами [7], вказує на те, що збільшення вмісту CO_2 у біогазі супроводжується зростанням ексергетичних втрат через неповне згоряння. Водночас автори [8] обґрунтували переваги рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) для реалізації режиму низькотемпературного горіння (MILD), що мінімізує термічні напруження стінок камери. Питання спільного спалювання (cofiring) досліджено в роботах [9], а для котлів із киплячим шаром [10] визначили найбільш ефективну схему подачі біогазу через перший ряд отворів вторинного повітря.

Обґрунтування напряму дослідження. Узагальнюючи результати вищезазначених досліджень, можна констатувати, що попри значний прогрес у вивченні кінетики горіння біогазу, питання комплексного впливу переходу на альтернативне паливо для котлів серії ДКВР радянського зразка залишається розкритим не в повній мірі. Зокрема, потребує уточнення характер розподілу локальних теплових потоків на екрани паливні при роботі на біогазі зі значним вмістом баластних газів, що безпосередньо впливає на надійність трубної системи та прогнозований 15-річний ресурс барабанів-сепараторів [10]. З огляду на це, у даній роботі на основі верифікованих підходів [4] та екологічних рішень [11], реалізовано власну тривимірну CFD-модель котла ДКВР-10-13. Це дозволило провести поглиблений порівняльний аналіз процесів, що мають місце в паливній котла, при спалюванні природного газу та біогазу, враховуючи не лише емісію NO_x , а й зміну термомеханічного навантаження на елементи конструкції, що є критично важливим для продовження ресурсу обладнання в умовах декарбонізації енергетики України.

Постановка завдання. Метою статті є встановлення закономірностей зміни теплотехнічних та екологічних показників котла ДКВР-10-13 при переході на біогазове паливо в широкому діапазоні регулювання теплової потужності (від 40% до 100% номінального навантаження) для забезпечення надійної та безперебійної експлуатації обладнання в умовах декарбонізації енергетики.

Метод дослідження – CFD-моделювання основних характеристик процесів горіння під час спалювання метану і біогазу в комп'ютерній моделі

паливні котла ДКВР-10-13 в штатних і модернізованих пальниках ГМГ-5. Комп'ютерне моделювання виконувалося в середовищі програмного комплексу ANSYS Student, що є абсолютно безкоштовним (з 2015 року) і призначеним для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести порівняльний CFD-аналіз процесів, що мають місце в паливні котла при спалюванні природного газу та біогазу з урахуванням зміни масових витрат палива і повітря, необхідних для підтримки заданих режимів навантаження (100, 80, 60 та 40%).

2. Дослідити динаміку температурних полів та концентрацій компонентів (CH_4 , CO_2 , CO) у паливні котла при зниженні теплового навантаження, з метою визначення меж стабільності горіння низькокалорійного біогазу.

3. Оцінити екологічну ефективність переведення котла на біогаз шляхом моделювання локальної та інтегральної емісії оксидів азоту (NO_x) на різних режимах роботи, враховуючи пригнічення термічного механізму їх утворення при зниженні пікових температур.

4. Встановити вплив варіативності навантаження на розподіл локальних теплових потоків на екранні поверхні, що дозволить ідентифікувати зони потенційного термічного перекоосу та оцінити зміну теплової ефективності паливні при роботі на біогазі.

5. Обґрунтувати можливість експлуатації котла на низьких навантаженнях (40...60%) без критичного зниження повноти згоряння та зі збереженням нормативних показників якості пари, що є важливим для маневрових режимів роботи муніципальних котельень.

Об'єктом дослідження є процеси тепломасообміну, горіння та формування напружено-деформованого стану в елементах котельних агрегатів промислової та муніципальної енергетики (зокрема котлів типу ДКВР та пелетних котлів малої потужності) при їх експлуатації на альтернативних видах палива.

Предметом дослідження є пошук взаємозв'язку між складом біопалива, конструктивними параметрами пальників, температурними полями в паливні та показниками екологічної безпеки NO_x .

Виклад основного матеріалу. Представлений в статті аналіз доступної літератури свідчить, що біогаз може а вже активно використовується як паливо для котлів. Його особливістю є знижений

(60...75%) вміст метану (порівняно з природним газом) оскільки в його складі наявний діоксид вуглецю в кількості (25...40%). Завдяки цьому, спалювання біогазу відбувається з мінімальним утворенням окислів азоту [3]. Для моделювання використовувався склад біогазу очисних споруд Бортницької станції аерації в м. Києві. Цей біогаз містить 67,76% CH_4 ; 31% CO_2 ; 0,44% O_2 ; 0,57% N_2 ; 0,13% H_2 ; 0,04% H_2S .

Моделювання спалювання біогазу в ANSYS Fluent є складнішим за моделювання чистого метану, оскільки біогаз містить значну частку вуглекислого газу (CO_2), що впливає на температуру факела, кінетику реакцій та емісію NO_x . Для вирішення цієї проблеми в представленій роботі використана модель горіння (Species Model) для моделювання детальної кінетики та викидів NO_x . Склад суміші задавався за допомогою Reaction Constants. Турбулентно-хімічну взаємодію (Turbulence-Chemistry Interaction) для точних розрахунків моделювали за допомогою Eddy-Dissipation Concept. Для моделювання турбулентності вибрана Realizable k-ε модель, оскільки в роботі використовувались пальники із завихренням, а згадана модель забезпечує достатньо гарний баланс між точністю та ресурсами.

Докладно, математичний опис процесу тепло-масообміну та застосованих моделей турбулентно-хімічної взаємодії горіння біогазу в паливні котла ДКВР-10-13 представлено в роботі [12].

Граничні умови та параметри моделювання, такі як і в роботах [13-17]. В даній роботі використано наступні параметри розрахункової схеми:

1. Вхід палива (Fuel Inlet). Для обох випадків задано граничну умову типу «Mass Flow Inlet» (масова витрата на вході). Природний газ: Склад прийнято як 100% CH_4 (спрощена модель). Нижча теплота згоряння $Q_{\text{н}}^{\text{н}} = 35,8$ МДж/нм³. Біогаз: Нижча теплота згоряння суміші становить приблизно 21,5 МДж/нм³. Згідно заданого складу розраховані масові частки (Mass Fractions) і задані в якості граничних умов. Температура палива 313 К (з урахуванням підігріву).

2. Подача повітря (Air Inlet) Гранична умова задана як «Velocity Inlet» (швидкість на вході) або «Mass Flow Inlet». Коефіцієнт надлишку повітря (α): Для обох випадків прийнято рівним 1,05. Склад повітря: $Y_{\text{O}_2} = 0,233$; $Y_{\text{N}_2} = 0,767$. Температура: Повітря подається після повітропідігрівника з температурою 423 К (150 °С). Оскільки біогаз містить менше метану на одиницю об'єму палива, масова витрата повітря для біогазу при однаковій витраті суміші палива повинна бути перерахована

відповідно до стехіометричного відношення для забезпечення стабільного горіння.

3. Стінки паливні (Walls). Для стінок екранних труб задано граничну умову типу «Wall» із тепловими характеристиками:

Тепловий режим: Задано фіксовану температуру стінки або коефіцієнт теплопередачі. Враховуючи робочий тиск у барабані 3,9 МПа, температура насичення становить ≈ 250 °С. Emissivity (Ступінь чорноти): Для зашлакованих стінок прийнято $\varepsilon = 0,8 \dots 0,85$.

4. Вихід димових газів (Pressure Outlet). На виході з паливни (у площині фєстону) встановлено умову «Pressure Outlet»: Static Pressure: 0 Па (надлишковий тиск відносно атмосферного). Backflow Temperature: 1200...1300 К (температура газів на виході для запобігання проблемам зі збіжністю при зворотному тоці).

Витрата газу через пальник V_{Γ} автори визначали за формулою, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_{\Gamma} = \frac{Q_n}{Q_n^p \cdot N \cdot \eta}, \quad (1)$$

де Q_n – номінальна теплова потужність пальника, кВт; Q_n^p – нижча теплота згоряння газу, кДж/м³; N – кількість однотипних пальників, що приймаються до встановлення з однаковою витратою газу (в представленій роботі використано 4-ри пальники розташованих на фронтальних стінах котла); η – ККД пальника.

Необхідна витрата повітря через пальник розраховувалась за формулою, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_n = \alpha \cdot V_{\Gamma} \cdot V_n^0, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря, що подається в топкову камеру. При горінні газового палива прийнятий рівним 1,05; V_n^0 – витрата повітря, необхідна для горіння 1 м³ газу, м³/м³. Для точного налаштування граничної умови Air Inlet в ANSYS Fluent необхідно розрахувати теоретично необхідний боєм повітря V^0 для повного спалювання 1 м³ біогазу.

В роботі виконано розрахунок необхідної кількості кисню для кожного горючого компонента біогазу:

Для метану ($\text{CH}_4 = 67,7\%$): На 1 моль CH_4 потрібно 2 моль O_2 :

$$V_{\text{O}_2, \text{CH}_4} = 0,677 \cdot 2 = 1,354, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ палива}, \quad (3)$$

Для водню ($\text{H}_2 = 0,13\%$): На 1 моль H_2 потрібно 0,5 моля O_2 :

$$V_{\text{O}_2, \text{H}_2} = 0,013 \cdot 0,5 = 0,00065, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ палива}, \quad (4)$$

Для сірководню ($\text{H}_2\text{S} = 0,04\%$): На 1 моль H_2S потрібно 1,5 моля O_2 :

$$V_{\text{O}_2, \text{H}_2\text{S}} = 0,0004 \cdot 1,5 = 0,0006, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ палива}, \quad (5)$$

Біогаз уже містить 0,44% кисню який потрібно враховувати в паливі ($\text{O}_2 = 0,0044 \text{ м}^3/\text{м}^3$), тому кількість кисню, який потрібно подати ззовні ($V_{\text{O}_2}^{\text{ext}}$), становить:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{ext}} = (1,354 + 0,00065 + 0,0006) - 0,0044 = 1,35085 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ палива}, \quad (6)$$

Враховуючи, що вміст кисню в повітрі становить 21%:

$$V^0 = \frac{1,35085}{0,21} \approx 6,433 \text{ м}^3 \text{ повітря на } 1 \text{ м}^3 \text{ біогазу}, \quad (7)$$

При моделюванні в Fluent для котлів типу ДКВР зазвичай приймають коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,05$. В роботі вибрано $\alpha = 1,05$, то дійсна витрата повітря складе:

$$V^{\text{real}} = 6,433 \cdot 1,05 = 6,755 \text{ м}^3 \text{ повітря на } 1 \text{ м}^3 \text{ палива}, \quad (8)$$

Порівняно з природним газом (де $V^0 \approx 9,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$), для біогазу потрібно на 32% менше повітря. Це означає, що при модернізації котла ДКВР-10-13 під біогаз навантаження на дуттьові вентилятори зменшиться, але швидкість виходу суміші з пальника може змінитись, що вплине на довжину факела.

В роботі, навантаження котельного агрегату становило 100, 80, 60 і 40 відсотків від номінального навантаження. Для забезпечення такого навантаження, змінювались витрати газу і повітря, розраховані згідно формул (1 – 8).

Обговорення отриманих результатів. Результати моделювання представлені у вигляді розподілів окислів азоту, масових долей реагуючих компонентів реакції окислення, розподілів температур в поздовжньому перерізі котла, що проходить через пальник (рис. 1-5). А також розподілів локальних теплових потоків в на стінках котельного агрегату (рис. 6) для випадків спалювання як біогазу так і для природного газу.

Аналіз емісії окисидів азоту (NO_x) (рис. 1) свідчить, що при спалюванні природного газу (рис. 1б) зони максимальної концентрації NO_x значно більші, а пікові значення вищі, ніж при спалюванні біогазу (рис. 1а). Це пояснюється присутністю в біогазі баластного CO_2 , який знижує адиабатну температуру полум'я, пригнічуючи механізм утворення термічних NO_x .

Вплив навантаження характеризується тим, що для обох видів палива спостерігається чітка закономірність: зі зниженням навантаження від 100% до 40% концентрація NO_x монотонно зменшується. Це пов'язано зі зменшенням загального тепловиділення в топці та зниженням максимальних температур у ядрі факела. При 40% наванта-

женні зона утворення NO_x стає мінімальною та зосереджується лише у безпосередній близькості до пальника.

Розподіл масових часток метану (CH_4) (рис. 2) свідчить про те, що метановий струмінь при спалюванні природного газу (рис. 2б) виглядає більш концентрованим. У випадку біогазу (рис. 2а) початкова масова частка CH_4 у струмені нижча через розбавлення палива вуглекислотою, проте через більшу об'ємну витрату (необхідну для компенсації нижчої калорійності) струмінь біогазу має більшу далекобійність. Повнота згоряння: На

всіх режимах (100...40%) метан повністю витрачається в межах першої третини простору паливної. Це свідчить про високу якість змішування палива з повітрям та ефективність пальників навіть при переході на низькокалорійний біогаз. Зі зниженням навантаження довжина зони наявності незгорілого метану скорочується.

Розподіл вуглекислого газу (CO_2) (рис. 3) свідчить, що при спалюванні біогазу (рис. 3а) висока концентрація CO_2 спостерігається вже на зрізі пальника оскільки він є компонентом палива. При спалюванні природного газу (рис. 3б)

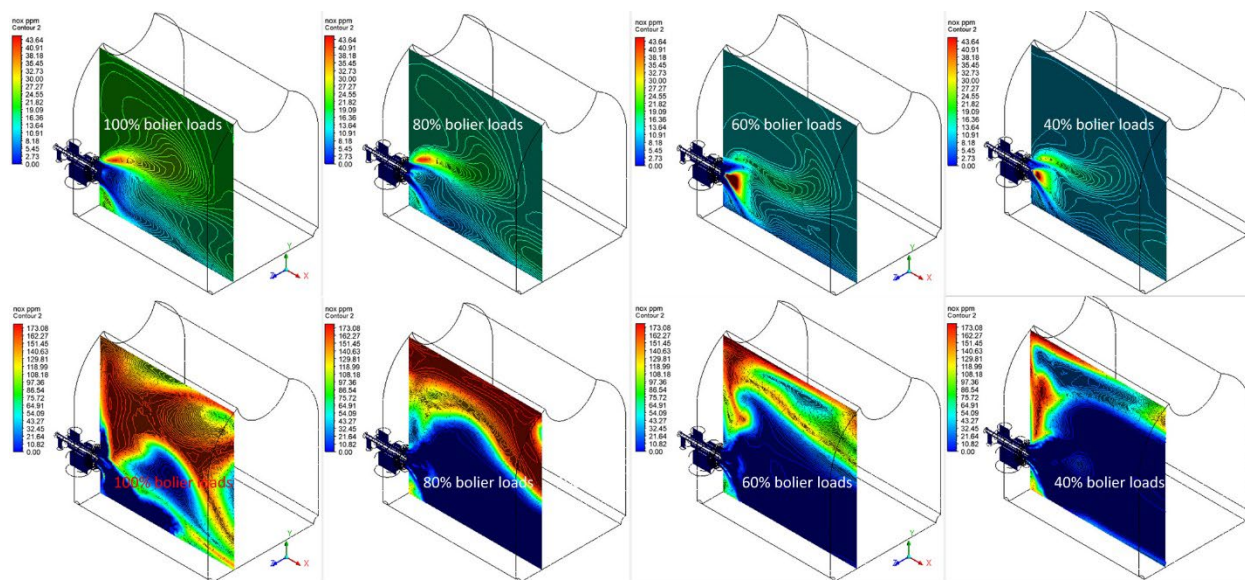


Рис. 1. Розподіл окислів азоту в перерізі паливної котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання біогазу (а) та природного газу

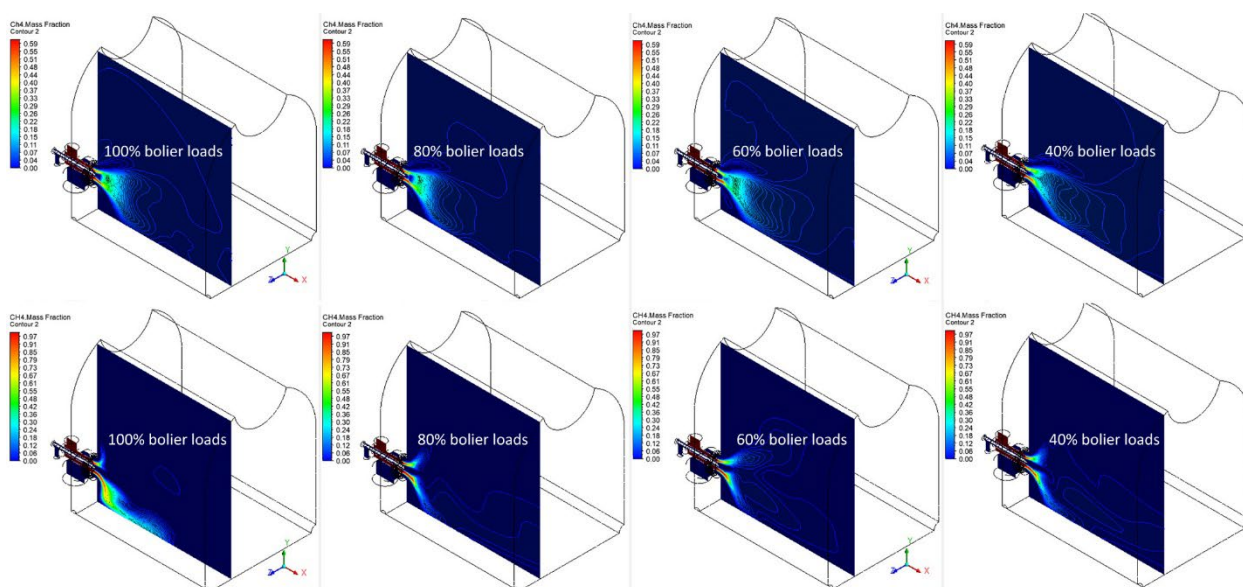


Рис. 2. Розподіл масових часток метану в перерізі паливної котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання біогазу (а) та природного газу

CO_2 з'являється лише в зоні реакції як продукт окислення вуглеводнів. Загальний рівень CO_2 в паливній котла при спалюванні біогазу значно вищий. Зі зниженням навантаження розподіл CO_2 стає більш рівномірним по всьому об'єму топки за рахунок зменшення інтенсивності турбулентних потоків та кращого заповнення простору паливними продуктами згоряння.

Розподіл монооксиду вуглецю (CO) характерний тільки для випадку спалювання природного газу. Крім того, рис. 4 свідчить, що CO є індикатором проміжних стадій горіння. Максимальні концентрації спостерігаються в ядрі факела, де відбувається інтенсивний розпад молекул CH_4 за умов локального дефіциту кисню. Завершення реакцій: До виходу з топки концентрація CO падає практично до нуля, що підтверджує відсутність хімічного недопалу. При зниженні навантаження (від а до г) зона наявності CO стискається, що вказує на швидше завершення окислювальних реакцій.

Температурні поля димових газів (рис. 5) свідчать, що максимальні температури при спалюванні природного газу (рис. 5б) на 100...150 °C вищі, ніж для біогазу (рис. 5а). Біогазовий факел має більш "розмите" температурне ядро. Динаміка навантаження: При 100% навантаженні (а) зона високих температур займає значну частину топки. При переході до 40% температурне поле стає «холоднішим», а градієнти температур — менш різкими. Це безпосередньо впливає на зниження генерації NO_x , про що свідчив рис. 1.

Локальні теплові потоки на стінках котла (рис. 6) свідчать, що при спалюванні біогазу (рис. 6а) теплові потоки розподілені більш рівномірно по поверхні екранів. Хоча пікові значення потоків нижчі за природний газ (рис. 6б), підвищений вміст трьохатомних газів (CO_2) у продуктах згоряння біогазу інтенсифікує радіаційний теплообмін.

Таким чином, високі локальні теплові потоки при спалюванні природного газу на 100% наван-

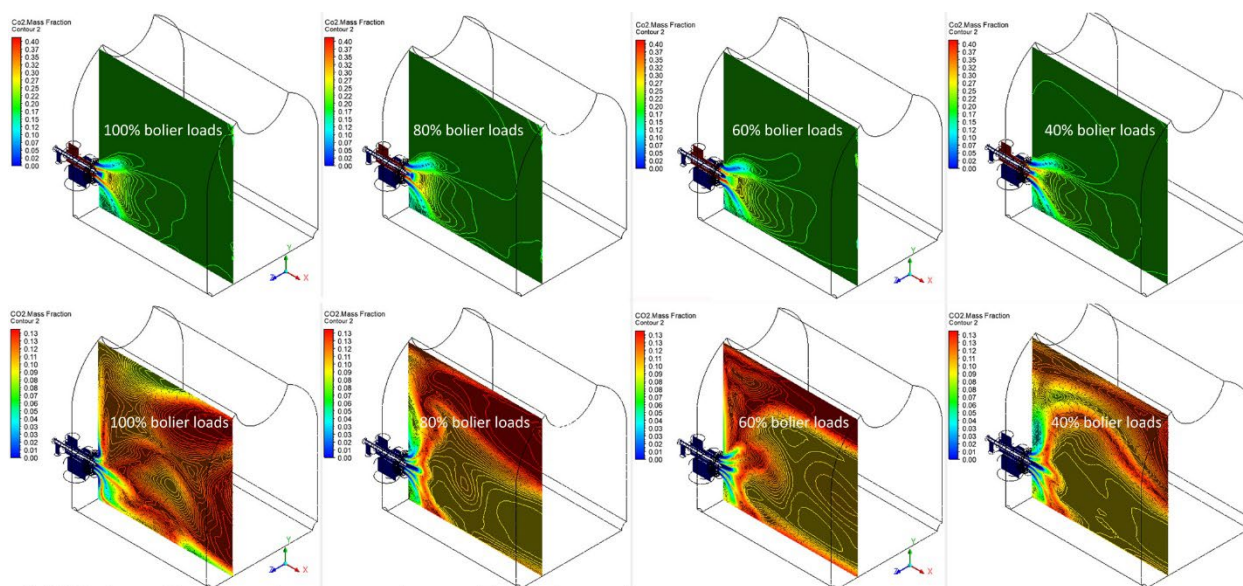


Рис. 3. Розподіл масових часток вуглекислого газу в перерізі паливної котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання біогазу (а) та природного газу

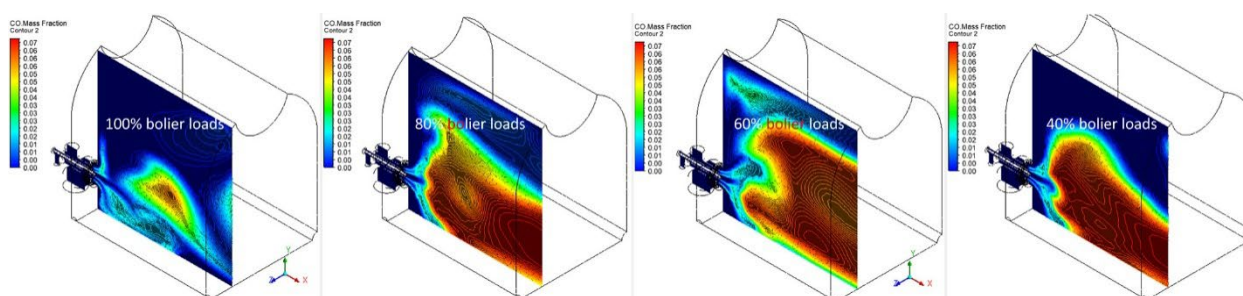


Рис. 4. Розподіл масових часток монооксиду вуглецю в перерізі паливної котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання природного газу при 100%-му (а), 80%-му (б), 60%-му та 40 %-му навантаженні

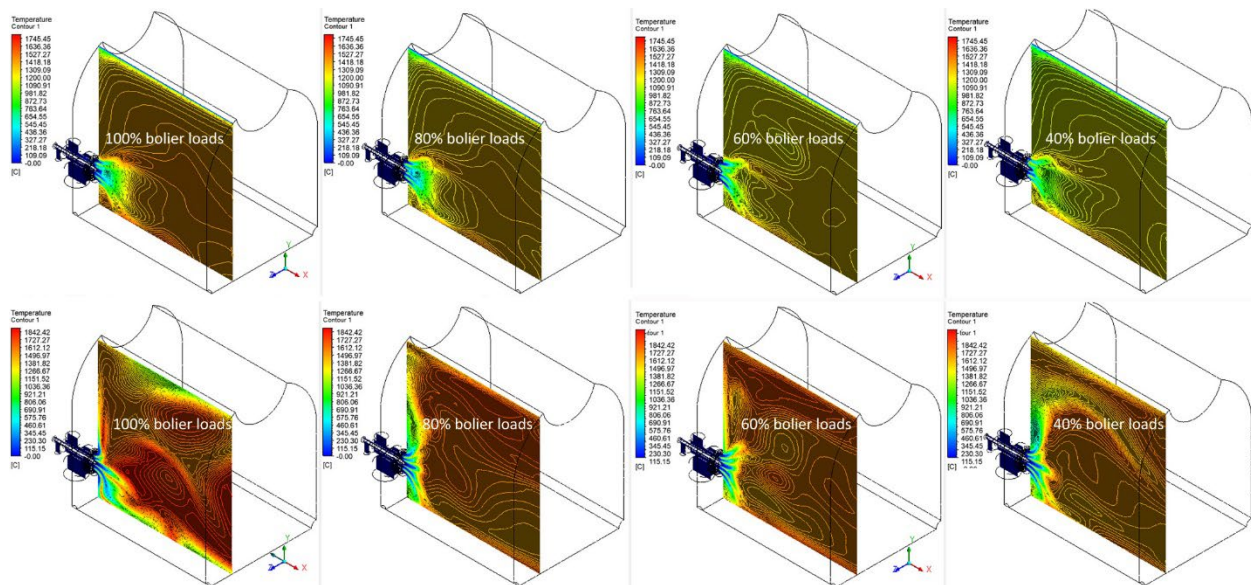


Рис. 5. Розподіл температур димових газів в перерізі паливної котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання біогазу (а) та природного газу

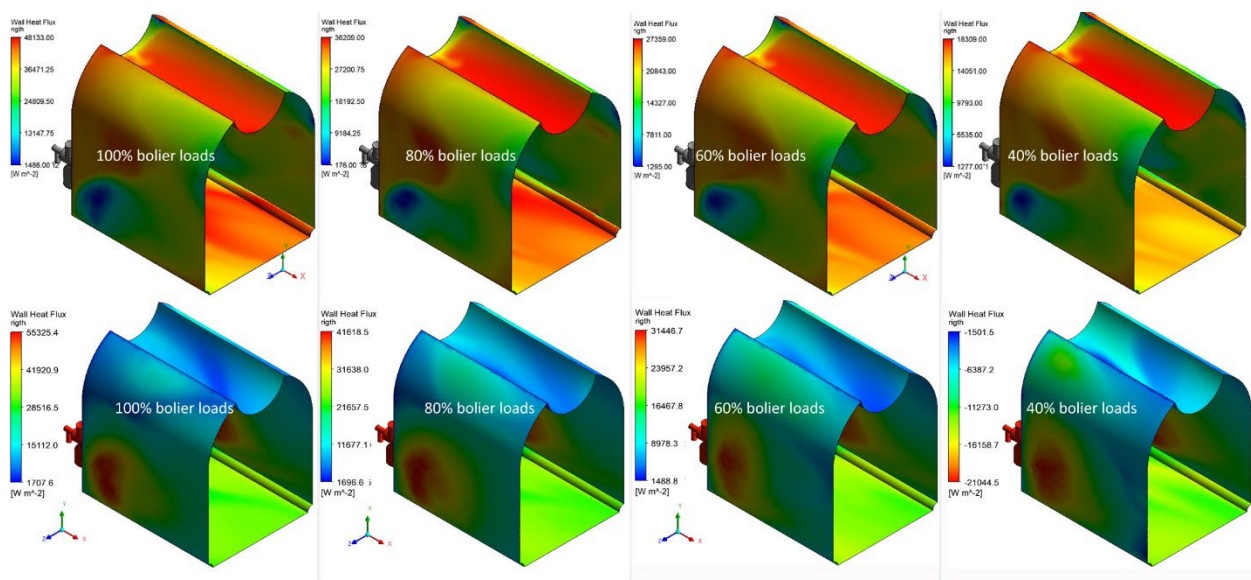


Рис. 6. Розподіл локальних теплових потоків на стінках паливної котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання біогазу (а) та природного газу

таженні створюють ризики локальних перегрівів труб. Біогаз забезпечує більш м'який тепловий режим роботи екранних поверхонь. Зі зменшенням навантаження інтенсивність теплових потоків падає пропорційно падінню температур у паливній котла ДКВР-10-13.

Висновки. На основі проведеного комплексу чисельних досліджень теплотехнічних та екологічних характеристик котла ДКВР-10-13 при спалюванні природного газу та біогазу в діапазоні навантажень 40–100 % від номінального, встановлено наступне:

1. Стабільність горіння та повнота згоряння: Аналіз розподілу масових часток метану (CH_4) та монооксиду вуглецю (CO) підтвердив, що при використанні штатних модернізованих пальників ГМГ-5 забезпечується стабільне займання та повне вигорання біогазу на всіх досліджених режимах. Навіть при глибокому розвантаженні до 40 % зона активних хімічних реакцій залишається зосередженою в межах першої третини паливної, що свідчить про високу маневровість агрегату на альтернативному паливі.
2. Екологічна ефективність (NO_x): Доведено, що перехід на біогаз забезпечує суттєве

зниження емісії оксидів азоту на всіх режимах навантаження. При 100 % навантаженні пікові концентрації NO_x падають завдяки баластному CO_2 , який знижує температуру ядра факела на 100...150 °С. При зниженні навантаження до 40 % спостерігається додаткове падіння концентрації NO_x внаслідок загального зменшення теплової напруги об'єму паливної, що дозволяє виконувати вимоги Директиви 2010/75/EU без використання систем рециркуляції.

3. Тепловий стан та надійність: Встановлено, що робота на біогазі супроводжується «розмиттям» температурного ядра та зростанням далекобійності факела через більшу об'ємну витрату палива. Це призводить до більш рівномірного розподілу локальних теплових потоків на стінках паливної порівняно з природним газом. Такий характер теплообміну знижує ризики локальних перегрівів екранних труб, проте вимагає контр-

ольо температури газів поблизу заднього екрана на номінальних режимах.

4. Вуглецевий баланс та ККД: Розрахунково підтверджено, що попри зростання прямої емісії CO_2 на 66 % (92,03 кг/ГДж проти 55,22 кг/ГДж для метану) через нижчу калорійність біогазу, паливо є вуглецево-нейтральним згідно з методологією LCA. Підвищена концентрація CO_2 у продуктах згоряння інтенсифікує радіаційний теплообмін, що частково компенсує зниження температури факела та дозволяє підтримувати ККД котла на високому рівні в усьому діапазоні регулювання (40...100 %).

5. Практична реалізація: Отримані результати чисельного моделювання (зокрема, розподіли температур та теплових потоків) є базою для уточнення методик розрахунку залишкового ресурсу барабанів котлів ДКВР, враховуючи фактичну термомеханічну історію навантажень при роботі на біогенному паливі.

Список літератури:

1. Біоенергетична асоціація України. Динаміка зростання біогазових потужностей в Україні : аналітична доповідь. Київ, 2022. 42 с.
2. Сапегін О., Гелетуха Г. та ін. Аналіз розвитку відновлюваних джерел енергії в Україні до 2050 року : звіт. Київ, 2021. 84 с.
3. Трубочев М. А., Белоусов В. В. Вплив термофізичних властивостей продуктів згоряння біогазу на теплові розрахунки водогрійних котлів. *Вісник БДТУ ім. В.Г. Шухова*. 2024. № 9 (10). С. 63–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71.
4. Дубровський В. В., Шнирков П. В., Кузнецов О. Л. Дослідження викидів оксидів азоту при спалюванні суміші метану та вуглекислого газу в котлі ДКВР-6.5-13. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. № 4. С. 60–67. DOI: 10.33070/etars.4.2022.06.
5. Szkarowski A., Janta-Lipińska S., Gawin R. Reducing emissions of nitrogen oxides from dkvr boilers. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2016. Vol. 18, no. 1. P. 565–578.
6. Hosseini S. E., Bagheri G. Numerical modeling of biogas diffusion flame in a swirl-stabilized boiler under oxy-fuel conditions. *Energy*. 2022. Vol. 254. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125206.
7. Karatas S., Derbentli T. Exergetic evaluations of oxy-biogas combustion in an adiabatic furnace. *International Journal of Thermodynamics*. 2023. Vol. 26, no. 2. DOI: 10.5541/ijot.1587174.
8. Yusaf T., Al-Ashaab A. CFD modeling of MILD combustion using biogas with exhaust gas recirculation (EGR). *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2688. 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/2688/1/012023.
9. Liu H., Zhang J., Wu S. et al. Numerical simulation of biogas and coal co-combustion in a 300 MW tangential furnace. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9, no. 12. DOI: 10.1021/acsomega.4c00885.
10. Saeed M., Khan S. Investigation of optimal biogas injection location in a bubbling fluidized bed boiler. *CFD Letters*. 2024. Vol. 17, no. 6. P. 69–80. DOI: 10.37934/cfdl.17.6.6980.
11. Szkarowski A., Janta-Lipińska S. Development of steam injection technology for NO_x reduction in DKVR 10-13 boilers. *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 44. 00056. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400056. Kuo K. K. Principles of Combustion. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2005. 732 p.
12. Рачинський А.Ю., Баранюк О. В., Пікенін О. О., Тихоход В.О. Удосконалення показників надійності та екологічної безпеки котла дквр-10-13 при диверсифікації паливної бази. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2026. Т. 37 (76), № 2. С. ???–???
13. Peters N. Turbulent Combustion. Cambridge : Cambridge University Press, 2000. 304 p. (Cambridge Monographs on Mechanics).
14. Turns S. R. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. 3rd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2011. 736 p.
15. Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. Transport Phenomena. Revised 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2007. 928 p.

16. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2nd ed. Harlow : Pearson Education Limited, 2007. 517 p.
17. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 2024 R1. Canonsburg : ANSYS, Inc., 2024. 914 p.

Rachynskyi A.Yu., Baranyuk O.V., Onysko A.I., Pikenin O.O. MODELING OF FIRE PROCESSES IN THE DKVR-10-13 BOILER WHEN COMBUSTING BIOGENIC FUEL AT VARIABLE OPERATING MODES

The article solves a pressing scientific and technical problem of increasing the efficiency and environmental safety of steam boilers of the DKVR type in the conditions of decarbonization of the Ukrainian energy sector. The purpose of the study is to establish the patterns of changes in the thermal and environmental indicators of the DKVR-10-13 boiler when switching to biogas in a wide range of thermal power regulation (100%, 80%, 60% and 40% of the nominal). The object of the study is the processes of heat and mass transfer, combustion and the formation of a stress-strain state in the boiler elements when using alternative fuel. The methodology of the work is based on numerical CFD modeling in the ANSYS Student environment using the Realizable $k-\epsilon$ turbulence models and the Eddy-Dissipation Concept (EDC) turbulent-chemical interaction. The real composition of biogas from the Bortnytsia aeration station (Kyiv) with a methane content of 67,76% and carbon dioxide of 31% was used for the analysis. The work calculates stoichiometric ratios and boundary conditions for both types of fuel, taking into account that 32% less air is required for biogas combustion than for natural gas. The scientific novelty of the results lies in the identification of changes in the structure of the flare and the emission of pollutants during deep unloading of the unit. It has been established that the presence of ballast CO_2 in biogas reduces peak temperatures by 100–150 K, which leads to a significant suppression of thermal NO_x generation at all load modes. It has been proven that when the power is reduced to 40%, complete methane burnout is ensured within the first third of the fuel, which confirms the high maneuverability of the modernized HMG-5 burners. The effect of “blurring” the temperature core of the biogas flare has been revealed, which contributes to a more uniform distribution of local heat flows to the screens and reduces the risks of thermal distortions of the pipe system. The practical significance of the work lies in substantiating the carbon-neutral conversion of DKVR boilers to biogas in compliance with the standards of Directive 2010/75/EU and creating a basis for specifying calculations of the residual resource of separator drums.

Keywords: DKVR-10-13 boilers, biogas, CFD modeling, nitrogen oxides (NO_x), maneuverability, temperature field, heat flow, decarbonization.

Дата першого надходження статті до видання: 24.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Тортіка Д.М.

<https://orcid.org/0009-0003-2777-8955>

Одеський національний технологічний університет

ТЕРМООБРОБКА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ВИКОРИСТАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВАННЯ

Розглядається сучасний стан та перспективи використання мікрохвильового нагрівання для термообробки діелектричних матеріалів в процесі виготовлення функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ). Мікрохвильова обробка стає важливим інструментом у сучасних технологіях виготовлення матеріалів завдяки низці ключових переваг: швидке та рівномірне об'ємне нагрівання, висока селективність впливу на матеріали з різною діелектричною проникністю, суттєва енергоефективність та екологічність процесу. В статті відзначено, що мікрохвильове нагрівання дозволяє суттєво зменшити час спікання та енергоспоживання порівняно з традиційними тепловими методами. Зокрема, наведено результати актуальних досліджень, які демонструють успішне застосування мікрохвильового спікання для створення функціонально-градієнтних матеріалів із покращеними експлуатаційними характеристиками: збільшення інтенсивності спікання керамічних підложок у 4 рази, зниження енергоспоживання до 37%, формування багатошарових градієнтних структур $\text{Ti}_2\text{AlCo}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}$ із рекордним поглинанням електромагнітних хвиль (83,4 дБ) та створення алмазовмісних композитів $W\text{--}Si$ із підвищеною теплопровідністю. Разом з перевагами в статті висвітлено проблемні аспекти мікрохвильового нагрівання, що стримують його широке промислове впровадження. Серед основних проблем – нерівномірність нагріву, відома як ефект теплового розгону, що викликаний локальним перегрівом унаслідок неоднорідності матеріалів та температурної залежності поглинання електромагнітних хвиль. Також наголошується на жорсткій залежності від діелектричних властивостей матеріалів, що обмежує застосовність методу для певних сполук, а також на складнощях з масштабуванням технології при переході від лабораторних зразків до великомасштабного виробництва. Окрему увагу приділено перспективним технологічним підходам, зокрема гібридному нагріванню та методу температурного градієнта, які дозволяють ефективно розв'язати проблему теплового розгону.

Ключові слова: мікрохвильове нагрівання, функціонально-градієнтні матеріали, термообробка, кераміка, діелектричні матеріали, матеріалознавство.

Постановка проблеми. При виготовленні сучасної техніки виникають жорсткі вимоги до матеріалів, матеріали повинні бути одночасно твердими та гнучкими, стійкими до нагрівання та мати невелику вагу. Традиційні матеріали, що складаються з однорідних шарів часто не здатні витримати задані вимоги. Розв'язання цієї проблеми знайшли вчені ще в 1980-х роках, розробивши функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ) в статтях Рабіна [1], Салеха [2], Удупи [3], Мохаммаді [4].

Функціонально-градієнтні матеріали, це матеріали в яких мікроструктури змінюються плавно по всьому виробу, що дає можливість поєднувати в собі властивості різних матеріалів, наприклад кераміки та діелектричних матеріалів.

Одним із перспективних методів виготовлення ФГМ є використання мікрохвильового нагрівання. При мікрохвильовому спіканні частинки матеріалів з'єднуються набагато швидше в порівнянні зі звичайними методами, описано в роботах Чандрасекарана [5], Леонеллі [6], Тостенсона [7]. Застосування мікрохвильового нагрівання створює умови для формування якісної градієнтної структури з мінімальними залишковими напруженнями, що значно підвищує експлуатаційні характеристики матеріалів Данца [8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В основі досліджень ФГМ стоїть принцип з'єднання різнорідних матеріалів способом, що використовує переваги кожного матеріалу. Через

відмінність коефіцієнтів теплового розширення залишкові термічні напруги в металокерамічних ФГМ часто неприпустимо великі. Основні переваги та обмеження використання мікрохвильового нагрівання при виготовленні ФГМ наведено в табл. 1.

Часто наведені проблеми пов'язані між собою та можуть мати спільні рішення за допомогою нових методів, удосконалення обладнання та дослідженням нових сполук матеріалів.

Згідно з статтею Даса [9] мікрохвильова обробка пропонує значні переваги в скороченні часу виробництва, економії енергії, підвищенні якості та нових можливостях у матеріалознавстві, однак для широкого комерційного впровадження потрібні додаткові фундаментальні дослідження і подолання технічних перешкод.

Ефективність використання мікрохвильового поля на практиці, в порівнянні з традиційним конвективним способом, показано в роботі Потапова та ін. [10]. На прикладі керамічної підложки з порошку карбиду кремнію товщиною приблизно 3 мм та розміром 165x165 мм було показано, що мікрохвильове спікання дозволяє збільшити інтенсивність процесу спікання у 4 рази та знизити енергоспоживання на 37% порівняно з традиційним способом.

З недавніх досліджень успішне виготовлення ФГМ за використання мікрохвильового нагрівання наведено в роботі Се [11]. Головним досягненням є 10-хвилинний синтез багаточислової градієнтної структури на основі $Ti_2AlC_{0.5}N_{0.5}$ з високим поглинанням електромагнітних хвиль та ефективним тепловим екрануванням. В основі методу лежить оригінальна стратегія «мікрохвильового сольового синтезу з контрольованою дифузією вуглецю». Отриманий матеріал має

складну градієнтну будову: ядро з аморфізованого вуглецевого волокна, проміжний шар $TiCo_{0.5}No_{0.5}$ та зовнішню оболонку з $Ti_2AlCo_{0.5}No_{0.5}$. Така архітектура забезпечує виняткові функціональні властивості, що забезпечила рекордне поглинання електромагнітних хвиль (83,4 дБ) та ефективне теплове екранування при 600 °С. Дана методика дозволила розв'язувати проблему «теплового розгону». Дослідники свідомо створили зворотний температурний градієнт (гаряче волокно в холоднішому розчині) для спрямованої дифузії вуглецю та формування градієнтної структури.

Зокрема, в дослідженні Вея [12], при виготовленні ФГМ на основі алмазу та вольфрамо-мідної суміші, дослідники знайшли рішення таких проблем, як: недостатня теплопровідність традиційних W/Cu та графітизація алмазу при високих температурах, опираючись на збереження та покращення властивостей матеріалів на кожному етапі виготовлення. Для підвищення теплопровідності структури W/Cu автори додали алмазні частинки, які мають надзвичайно високу теплопровідність (~2200 Вт/(м·К)) і низький коефіцієнт теплового розширення, що покращило теплотехнічні властивості матеріалу. Для запобігання графітизації алмазу використали покриття з вольфраму товщиною близько 200 нм, що покращило сумісність фаз і захист. Мікрохвильове спікання забезпечило швидкий, рівномірний нагрів, який допоміг зберегти градієнтний склад та структуру, запобігти надмірному росту зерен і отримати щільності (до 94.66 %). Інтеграція алмазу у високомідний шар і використання мікрохвильового спікання дозволили отримати композит з покращеною теплопровідністю (220 Вт/(м·К) проти 209 Вт/(м·К) без алмазу) та кращою термічною стійкістю при теплових ударах.

Таблиця 1

Переваги та обмеження використання мікрохвильового нагрівання при виготовленні ФГМ

Переваги	Обмеження
Високошвидкісне об'ємне нагрівання	Нерівномірність нагріву (Тепловий розгін). Локальне перегрівання через неоднорідність складу ФГМ та зростання поглинання хвиль із температурою.
Селективність нагріву	Жорстка залежність від діелектричних властивостей. Метод просто "не працює" з матеріалами, які не поглинають мікрохвилі або є небезпечним при високій концентрації металів
Щільна структура зерен	Необхідність складного контролю процесу. Для запобігання тепловому розгону потрібен контроль температури в реальному часі та однорідності поля. Використання простих побутових печей часто є недостатнім і потребує модифікацій
Зниження енергоспоживання	Неконтрольований профіль температур, що ускладнює прогнозування термічних напружень
Екологічність та чистота процесу	Складність масштабування та відтворюваності. При переході від невеликого лабораторного зразка до великої партії виробів або виробів складної форми, картина нагріву може кардинально змінитися.
Компактність та гнучкість обладнання	Обмеження щодо форми та розміру виробів. Глибина проникнення мікрохвиль обмежена і залежить від частоти та властивостей матеріалу.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз останніх досліджень пов'язаних з ефективним виготовленням функціонально-градієнтних матеріалів за використання мікрохвильового нагрівання з виявленням основних невирішених проблем.

Виклад основного матеріалу. Теоретичні основи мікрохвильового нагрівання діелектриків. Мікрохвильове нагрівання - це процес перетворення електромагнітної енергії в теплову. Даний спосіб нагрівання дозволяє швидко та рівномірно прогрівати товстостінні вироби по усьому об'ємові виробу з мінімальними внутрішніми напруженнями, особливо в таких матеріалах, як кераміка та полімери. З фізичної точки зору електромагнітна енергія виникає коли електричне поле взаємодіє із зарядженими частинками. Електричне поле викликає в матеріалі різні види поляризації, такі як: електронна, атомна, орієнтаційна (обертання диполів) та міжфазна (ефект Максвелла-Вагнера), описувалося в роботі Анджелі [13], Мередита [14], Ачієрно [15]. Також в деяких випадках нагрівання виникає через магнітне поле, наприклад при використанні деяких водних електролітичних розчинів, магнітних діелектричних матеріалів і певних провідних порошкових матеріалів, продемонстровано в статті Сунь [16], Чена [17], Пена [18].

Виготовленням функціонально-градієнтних матеріалів за використання мікрохвильового нагрівання є відносно новою технологією та немає універсальної методики або інструкції. В свою чергу існують підходи, що базуються на властивостях мікрохвильового нагріву, властивостях матеріалів та утворення градієнтних структур.

Під час мікрохвильового нагрівання увагу необхідно виділяти на те що, мікрохвилі проникають в об'єм матеріалу і генерують тепло безпосередньо всередині матеріалу, поглинання мікрохвильової енергії визначається діелектричними властивостями матеріалу, характер нагріву дуже чутливий до розміру, форми зразка, частоти випромінювання та положення зразка в камері [5], [8].

Проаналізувавши доступну літературу можна виділити декілька основних підходів для виготовлення ФГМ за використання мікрохвильового нагрівання, це гібридне мікрохвильове нагрівання, метод температурного градієнта та імпульсне мікрохвильове нагрівання.

Гібридне мікрохвильове нагрівання використовують в ситуаціях коли матеріали погано поглинають мікрохвилі за кімнатної температури. Зразок оточують «суцелптором» (допоміжний нагрівач), який добре поглинає мікрохвилі та швидко нагрі-

вається. Суцелптор передає тепло зразка за допомогою теплопровідності та випромінювання на початковому етапі. Коли температура зразка досягає «критичної точки», він сам починає ефективно поглинати мікрохвилі, і далі нагрівається вже об'ємно [19].

Метод температурного градієнта призначений для спікання ФГМ, що складаються з компонентів з дуже різними температурами спікання. При мікрохвильового нагріву у зразку створюють контрольований градієнт температури. Це дозволяє різним частинам зразка з різним хімічним складом досягати своєї оптимальної температури спікання одночасно, мінімізуючи напруження [20].

Імпульсне мікрохвильове нагрівання (як перспективний напрям). При імпульсному нагріванні електромагнітна енергія поглинається безпосередньо в об'ємі матеріалу, а під час пауз тепло перерозподіляється внаслідок теплопровідності [21].

Технічні аспекти. Для виготовлення функціонально-градієнтних матеріалів в мікрохвильовому полі використовують мультимодові та моноמודові камери.

У мультимодових камерах мікрохвилі багаторазово відбиваються від стінок, створюючи складну інтерференційну картину (багато "мод" коливань). Це забезпечує в середньому рівномірне нагрівання зразків великого об'єму.

Мономодові камери створюють стоячу хвилю з чітко визначеним максимумом електричного поля в певній точці. Це дозволяє досягти надзвичайно високої та передбачуваної щільності енергії, що ідеально підходить для дослідження кінетики спікання малих зразків ФГМ або для з'єднання матеріалів.

В мікрохвильовій обробці функціонально-градієнтних матеріалів найпоширенішою є частота 2,45 ГГц, яка використовується в лабораторних і побутових установках завдяки доступності магнетронів і достатній глибині проникнення для більшості діелектричних матеріалів. Для промислових масштабів застосовують нижчі частоти, зокрема 915 МГц (або 896 МГц), які забезпечують значно більшу глибину проникнення електромагнітної хвилі, що критично для рівномірного об'ємного нагрівання великих виробів.

Для контролю температури при мікрохвильовому нагріванні ФГМ використовують три основні типи обладнання. Оптичні пірометри є найпоширенішим вибором, оскільки вони працюють безконтактно, вимірюючи інфрачервоне випромінювання поверхні зразка, що дозволяє уникнути впливу електромагнітного поля на датчик. Термопары викорис-

товуються рідше через ризик нагрівання металевих дрітків у полі та спотворення результатів, тому для роботи в мікрохвильових установках застосовують спеціальні екрановані або надтонкі термодари, або ж вимірювання проводять у паузах між імпульсами нагріву. Тепловізори, які дозволяють отримувати повну двовимірну картину розподілу температури на поверхні зразка в реальному часі. Комбінування цих методів дозволяє досягти необхідної точності контролю температурних полів.

Для подолання проблеми теплового розгону та нерівномірності нагріву дедалі частіше застосовують моделювання процесу мікрохвильової обробки ФГМ. Один із методів моделювання мікрохвильової обробки ФГМ є метод скінченних елементів (FEM), що дозволяє враховувати залежність діелектричних і теплофізичних властивостей від температури, координат (для ФГМ) та пористості. У роботі Цуя [22] розроблено використана мультифізична чисельна модель, яка інтегрує розв'язання рівнянь електромагнетизму і теплопереносу задля дослідження поведінки Y-TZP кераміки в мікрохвильовому полі. Ця модель відповідає за прогнозування тривимірного розподілу електромагнітного поля і температури, а також дозволяє аналізувати вплив параметрів системи на ефективність нагріву до проведення експерименту. Для аналізу нелінійної теплопровідності в градієнтних середовищах також використовують безсіткові методи (LBIEM) Сладека [23]. На макрорівнях застосовують метод дискретних елементів для дослідження впливу контактів між частинками на локальне поглинання енергії [23]. Поєднання цих підходів дозволяє не лише оптимізувати режими нагріву, а й передбачити формування градієнтної структури з мінімальними залишковими напруженнями.

Моделювання процесу підтверджує свою ефективність, проте створення адекватних моделей для матеріалів із градієнтними діелектричними властивостями досі залишається складною науково-технічною задачею.

Практичне застосування отриманих ФГМ. ФГМ знаходять практичне застосування в бага-

тьох високотехнологічних галузях, де особливу роль грають здатність витримувати термічні й механічні напруження, а також стійкість до впливу агресивних середовищ. ФГМ використовуються в таких сферах, як: аерокосмічна галузь (теплозахисні покриття), біомедицина (імпланти), енергетика та промислове виробництво (зносо-стійкі інструменти), електроніка (термоелектричні напівпровідники) та інше [24].

Висновки. В даній роботі проаналізовано сучасні рішення по виготовленню функціонально-градієнтних матеріалів за використання мікрохвильового нагрівання.

Виявлено основні обмеження, що стримують широке промислове впровадження мікрохвильової обробки ФГМ. До них належать: нерівномірність нагріву (ефект теплового розгону), критична залежність від діелектричних властивостей матеріалів, складність масштабування процесу та необхідність контролю температурних полів у реальному часі.

Аналіз останніх досліджень, зокрема робіт [10], [11], [12] демонструє успішне застосування мікрохвильового спікання для створення ФГМ із покращеними експлуатаційними характеристиками. Доведено, що використання цього методу дозволяє інтенсифікувати процес виробництва (зменшення часу спікання у 4 рази), знизити енергоспоживання (до 37%) та забезпечити формування унікальних структур.

Виготовленням функціонально-градієнтних матеріалів за використання мікрохвильового нагрівання є перспективним напрямом, як для досліджень, так і промислового виробництва, та потребують подальшого вивчення та розв'язання технічних проблем пов'язаних з переходом до масштабного виробництва.

Моделювання процесу мікрохвильової обробки ФГМ дозволяє спрогнозувати та вирішити проблему теплового розгону та нерівномірності нагріву до проведення експерименту, але створення адекватних моделей для матеріалів із градієнтними структурами досі є складною задачею.

Список літератури:

1. Rabin B. H., Shiota I. Functionally Graded Materials. *MRS Bulletin*. 1995. Vol. 20, no. 1. P. 14–18. URL: <https://doi.org/10.1557/s0883769400048855>.
2. 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges / B. Saleh et al. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 201. P. 108376. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108376>.
3. Udupa G., Rao S. S., Gangadharan K. V. Functionally Graded Composite Materials: An Overview. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 5. P. 1291–1299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.442>.

4. Mohammadi M., Rajabi M., Ghadiri M. Functionally graded materials (FGMs): A review of classifications, fabrication methods and their applications. *Processing and Application of Ceramics*. 2021. Vol. 15, no. 4. P. 319–343. URL: <https://doi.org/10.2298/pac2104319m>.
5. Chandrasekaran S., Ramanathan S., Basak T. Microwave material processing-a review. *AIChE Journal*. 2011. Vol. 58, no. 2. P. 330–363. URL: <https://doi.org/10.1002/aic.12766>.
6. Microwave assisted sintering of green metal parts / C. Leonelli et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 205, no. 1-3. P. 489–496. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.263>.
7. Thostenson E. T., Chou T. W. Microwave processing: fundamentals and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999. Vol. 30, no. 9. P. 1055–1071. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(99\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(99)00020-2).
8. Dantz D. [Eigenspannungen in mikrowellengesinterten Ni/8Y-ZrO₂ und NiCr8020/8Y-ZrO₂ Gradientenwerkstoffen / vorgelegt von Dirk Dantz. 2000. URL: <http://d-nb.info/96029242X/34>.
9. Prospects of microwave processing: An overview / S. Das et al. *Bulletin of Materials Science*. 2009. Vol. 32, no. 1. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1007/s12034-009-0001-4>.
10. Дослідження високоінтенсивного нагріву при спіканні технічної кераміки / В. О. Потапов та ін. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024. Т. 59, № 4. С. 261–268. URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2809>.
11. Multilayered gradient Ti₂AlC_{0.5}N_{0.5} prepared by crystal/amorphous C diffusion for efficient electromagnetic absorption and thermal shielding / C. Xie et al. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63975-1>.
12. Fabrication of diamond/W–Cu functionally graded material by microwave sintering / C. Wei et al. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.035>.
13. Angela A., d'Amore M. Relevance of Dielectric Properties in Microwave Assisted Processes. *Microwave Materials Characterization*. 2012. URL: <https://doi.org/10.5772/51098>.
14. Meredith R. J. Engineers' handbook of industrial microwave heating. London : Institution of Electrical Engineers, 1998. 363 p.
15. Acierno D., Barba A. A., d'Amore M. Heat transfer phenomena during processing materials with microwave energy. *Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 40, no. 5. P. 413–420. URL: <https://doi.org/10.1007/s00231-003-0482-4>.
16. Sun J., Wang W., Yue Q. Review on Microwave-Matter Interaction Fundamentals and Efficient Microwave-Associated Heating Strategies. *Materials*. 2016. Vol. 9, no. 4. P. 231. URL: <https://doi.org/10.3390/ma9040231>.
17. Cheng, J., Roy, R. & Agrawal, D. Experimental proof of major role of magnetic field losses in microwave heating of metal and metallic composites. *Journal of Materials Science Letters* **20**, 1561–1563 (2001). URL: <https://doi.org/10.1023/A:1017900214477>
18. Peng Z., Hwang J.-Y., Andriese M. Magnetic Loss in Microwave Heating. *Applied Physics Express*. 2012. Vol. 5, no. 2. P. 027304. URL: <https://doi.org/10.1143/apex.5.027304>.
19. Processing of Ceramics / ed. by A. Ikesue. Wiley, 2021. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119538806>.
20. Kimura H., Satoh T. Residual Stress Control of Functionally Graded Materials via Pulse-Electric Discharge Consolidation with Temperature Gradient Control. *Functionally Graded Materials* 1996. 1997. P. 355–360. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-044482548-3/50059-7>.
21. Makino Y., Miyake S. Capabilities of Electromagnetic Processing for New Materials Syntheses. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*. 2002. Vol. 49, no. 10. P. 871–878. URL: <https://doi.org/10.2497/jjspm.49.871>.
22. Microwave-induced heating behavior of Y-TZP ceramics under multiphysics system / K. Cui et al. *Green Processing and Synthesis*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 119–130. URL: <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0013>.
23. Sladek J., Sladek V., Zhang C. A local BIEM for analysis of transient heat conduction with nonlinear source terms in FGMs. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2004. Vol. 28, no. 1. P. 1–11. URL: [https://doi.org/10.1016/s0955-7997\(03\)00093-6](https://doi.org/10.1016/s0955-7997(03)00093-6).
24. Wetherhold R. C., Seelman S., Wang J. The use of functionally graded materials to eliminate or control thermal deformation. *Composites Science and Technology*. 1996. Vol. 56, no. 9. P. 1099–1104. URL: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(96\)00075-9](https://doi.org/10.1016/0266-3538(96)00075-9).

Tortika D.M. HEAT TREATMENT OF DIELECTRIC MATERIALS IN THE MANUFACTURE OF FUNCTIONAL GRADIENT MATERIALS USING MICROWAVE HEATING

The current state and prospects of using microwave heating for heat treatment of dielectric materials in the process of manufacturing functionally gradient materials (FGM) are considered. Microwave processing is becoming an important tool in modern materials manufacturing technologies due to a number of key

advantages: rapid and uniform volumetric heating, high selectivity of the effect on materials with different dielectric permittivities, significant energy efficiency, and environmental friendliness of the process. The article notes that microwave heating allows for a significant reduction in sintering time and energy consumption compared to traditional thermal methods. In particular, the results of recent studies are presented, demonstrating the successful application of microwave sintering to create functionally graded materials with improved performance characteristics: a fourfold increase in the sintering intensity of ceramic substrates, a reduction in energy consumption by up to 37%, formation of multilayer gradient $\text{Ti}_2\text{AlCo}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ structures with record electromagnetic wave absorption (83.4 dB), and creation of diamond-containing W–Cu composites with enhanced thermal conductivity. In addition to its advantages, the article highlights the problematic aspects of microwave heating that hinder its widespread industrial adoption. Among the main issues is uneven heating, known as the thermal runaway effect, which is caused by localized overheating due to material heterogeneity and the temperature dependence of electromagnetic wave absorption. It also highlights the strong dependence on the dielectric properties of materials, which limits the method's applicability to certain compounds, as well as the challenges of scaling the technology when transitioning from laboratory samples to large-scale production. Special attention is given to promising technological approaches, in particular hybrid heating and the temperature gradient method, which allow for the effective resolution of the thermal runaway problem.

Keywords: microwave heating, functionally graded materials, heat treatment, ceramics, dielectric materials, materials science.

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 669.15

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/25>**Бармін О.Є.**<https://orcid.org/0000-0001-7507-7596>Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВПЛИВ ВОЛЬФРАМУ НА ЗЕРЕННУ СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА

Стаття присвячена комплексному дослідженню впливу малих добавок вольфраму (0,5; 1,0; 1,5 ат.%) на зеренну структуру та механічні властивості полікристалічних сплавів системи Fe–W, отриманих методом вакуумного сплавлення. Підвищений науковий і практичний інтерес до ультрадрібнозернистих залізовмісних матеріалів обумовлений унікальним поєднанням у них підвищеної міцності, пластичності та ударної в'язкості при збереженні задовільної технологічності. Методологія дослідження охоплювала: металографічний аналіз на мікроскопі МІМ-7; рентгенофазовий аналіз на дифрактометрі ДРОН-4 (CuKα-випромінювання, $\lambda = 0,15406$ нм); растрову електронну мікроскопію з локальним EDX-аналізом; вимірювання мікротвердості за Вікерсом на приладі ПМТ-3 при навантаженнях 10–200 г. Встановлено, що вихідна структура всіх досліджуваних сплавів є однофазною – твердим розчином W в α -Fe, без слідів інтерметалідних фаз або карбідів. Виявлено ефективний модифікуючий вплив вольфраму на зеренну структуру: введення 1,5 ат.% W зменшує середній розмір зерна приблизно у 58 разів – з 1,5 мм до 26 мкм – зі зміною форми зерен від неправильної до правильної поліедричної. Методом EDX підтверджено формування зернограничних сегрегацій: вміст W на границі зерна (~15,8 ат.%) перевищує його значення в тілі зерна (~2,9 ат.%) у 5,45 раза, що свідчить про витиснення атомів W фронтом кристалізації. Концентраційна залежність мікротвердості демонструє монотонне зростання від ~750 МПа для чистого заліза до ~1250 МПа для Fe–1,5W. Аналіз механізмів зміцнення показав, що при 0,5 ат.% W переважає твердорозчинне зміцнення, тоді як при 1,0–1,5 ат.% W домінуючим стає зернограничне зміцнення. Запропоновано механізм модифікування через зернограничну сегрегацію тугоплавкого компонента. Отримані результати мають практичне значення для розробки конструкційних залізовмісних матеріалів шляхом мікролегування.

Ключові слова: модифікування, вольфрам, залізо, зеренна структура, зернограничні сегрегації, мікротвердість, рентгенофазовий аналіз, твердорозчинне зміцнення.

Постановка проблеми. Сучасна промисловість висуває дедалі жорсткіші вимоги до конструкційних металевих матеріалів – підвищення питомої міцності, стійкості до крихкого руйнування та збереження надійних характеристик в умовах циклічних та ударних навантажень. Одним із ключових структурних чинників, що визначають ці характеристики, є розмір зерна. Відповідно до закону Холла–Петча, зменшення середнього розміру зерна d обернено пропорційно пов'язане з границею текучості σ_0 , тобто збільшення дисперсності зерен на один порядок підвищує σ_0 у 3–4 рази без погіршення пластичності [1]. Крім того, дрібнозерниста структура суттєво знижує поріг холоднолам-

кості, підвищує в'язкість руйнування та опір втомі, що критично важливо для деталей машин, які працюють в умовах знакозмінних навантажень [2].

Водночас реалізація потенціалу дрібнозернистих матеріалів в умовах масового виробництва наштовхується на суттєву технологічну проблему: традиційні методи подрібнення зерна – термомеханічне оброблення, інтенсивна пластична деформація – вимагають складного та дорогого обладнання, багатостадійних технологічних процесів і значних енергетичних витрат [3, 4]. Тому пошук простих, дешевих і ефективних способів управління зеренною структурою залишається першочерговим завданням матеріалознавства.

Особливу роль у цьому контексті відіграє модифікування – введення в розплав мікрокількостей спеціальних домішок, що кардинально змінюють умови нуклеації та зростання зерен при кристалізації, не змінюючи при цьому хімічного складу сплаву в його макроскопічному розумінні. Незважаючи на тривалу практику застосування модифікаторів у ливарному виробництві, механізми впливу тугоплавких легуючих елементів у концентраціях порядку 1 ат.% на зеренну структуру залізовмісних сплавів при вакуумному сплавленні залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, відкритим залишається питання про роль зернограничних сегрегацій тугоплавкого компонента у формуванні дрібнозернистої структури та відповідних механічних властивостей – що і становить наукову проблему, якій присвячена дана стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зв'язок між розміром зерна та механічними властивостями металів описується законом Холла–Петча, критичний аналіз якого за шість десятиліть [1] дозволив встановити межі його застосовності: лінійна залежність між міцністю та $d^{-1/2}$ порушується при розмірах зерна менше 20 нм. Для досягнення субмікронної та нанокристалічної структури в металах традиційно застосовують методи інтенсивної пластичної деформації (ППД) – рівноканальне кутове пресування, кручення під тиском тощо. Огляд розвитку цих методів [3] засвідчив, що, попри здатність подрібнювати зерно до нанометрового масштабу, вони залишаються технологічно складними та вимагають спеціалізованого обладнання. Систематизація структурної еволюції металів за ППД [4] додатково показала, що механізми формування ультрадрібнозернистої структури принципово різняться залежно від класу матеріалу, що ускладнює універсальне масштабування методів.

Альтернативою деформаційним підходам є хімічний шлях управління зеренною структурою – цілеспрямована сегрегаційна інженерія. Концепцію «grain boundary segregation engineering», розвинуту в роботі [5], спрямовано на проектування властивостей міжзеренних границь через введення в сплав елементів із сильною схильністю до сегрегації. Суть підходу полягає в тому, що атоми легуючого елемента, виштовхуючись із кристалічної решітки на границі зерен, одночасно гальмують їх ріст при кристалізації і підвищують енергетичний бар'єр для зернограничного ковзання. Це уможливило отримання дрібнозернистих матеріалів із підвищеною твердістю безпосередньо при кристалізації, без додаткових деформаційних операцій.

Фундаментальні засади зернограничних сегрегацій у залізовмісних системах детально розглянуто в [6] – комплексному огляді термодинамічних і кінетичних аспектів сегрегацій для широкого кола легуючих елементів. Встановлено, що елементи з малою рівноважною розчинністю в матриці, до яких належить і вольфрам в α -Fe, демонструють найбільш виражену схильність до накопичення на границях зерен, а їхній коефіцієнт збагачення β може сягати 5–15 і вище. Енергетичну вигідність такої сегрегації підтверджено сучасними *ab initio* розрахунками: результати масштабного DFT-дослідження сегрегації та когезії різних елементів на границях зерен феритного заліза [7] встановили, що тугоплавкі елементи з великим атомним радіусом знижують поверхневу енергію границь зерен, роблячи сегрегований стан термодинамічно вигідним. Нещодавнє дослідження [8] уточнило цю картину, показавши, що вторинні дислокації на границях зерен суттєво змінюють спектри енергій сегрегації – факт, що пояснює розкид значень β , зафіксованих в експериментах.

З точки зору стабільності нанокристалічних сплавів, термодинамічне обґрунтування для системи Fe–W отримано в [9] за допомогою моделювання методом Монте-Карло: система W–Fe ідентифікована як «сегрегаційно-стабілізована», в якій зернограничне збагачення W термодинамічно перешкоджає аномальному росту зерен навіть при підвищених температурах. Порівняльний аналіз двох стратегій стабілізації нанокристалічних металів – хімічного легування границь зерен і формування малоенергетичних кристалографічних границь – у роботі [10] підтвердив, що для системи Fe–W хімічна стабілізація через сегрегацію W є провідним механізмом збереження дрібнозернистої структури.

Для споріднених систем та матеріалів накопичено певний експериментальний доробок. Зокрема, виявлений для середньоентропійних сплавів ефект [11] – суттєвий вплив локального хімічного порядку на механічні властивості однофазних систем – вказує на те, що навіть у відсутність окремих фаз хімічна неоднорідність на нанорівні відіграє визначальну роль, що є актуальним і для ОЦК-системи Fe–W. Водночас питання про зв'язок концепції сегрегаційної інженерії з кристалізацією ливарних сплавів залишається менш вивченим: принципи [5, 10] розроблялися переважно стосовно відпалених чи деформованих матеріалів, тоді як процеси сегрегації безпосередньо при твердінні розплаву аналізувалися значно рідше.

Постановка завдання. Метою роботи є встановлення закономірностей впливу малих добавок вольфраму (0,5–1,5 ат.%) на зеренну структуру, фазовий склад та механічні властивості полікристалічних сплавів Fe–W, отриманих вакуумним сплавленням, а також обґрунтування механізму модифікуючої дії вольфраму.

Виклад основного матеріалу. Об'єктами дослідження були сплави заліза, що леговані вольфрамом. Зразки сплавів Fe, Fe–W були отримані в однакових технологічних умовах методом сплавлення у вакуумі (ступінь вакууму $\sim 10^{-5}$ мм. рт. ст.), усі виливки кристалізувались з однаковим ступенем переохолодження. Для мінімізації впливу сторонніх домішок на експериментальні результати при отриманні зразків застосовувалися компоненти вакуумної переплавки з чистотою $\sim 99,97$ мас.%. В роботі досліджувалися чотири типи зразків з малою кількістю легуючого елементу 0,5; 1,0 та 1,5 ат. %.

Виготовлення мікрошліфів проводили за стандартною металографічною методикою. Для дослідження мікроструктури зразків використовували мікроскоп МІМ-7 з цифровою реєстрацією зображення.

Фазовий склад досліджуваних зразків визначався за допомогою рентгенофазового аналізу (РФА) на дифрактометрі ДРОН-4 у фільтрованому мідному випромінюванні ($\lambda = 0,15406$ нм). Ідентифікацію фаз проводили методом порівняння отриманих значень міжплощинних відстаней d_{hkl} з табличними значеннями для очікуваних фаз. Аналіз положення та ширини дифракційних піків дозволив оцінити зміну параметра кристалічної решітки та розміру областей когерентного розсіювання (ОКР).

Морфологію поверхні зразків та локальний елементний склад досліджували на растровому електронному мікроскопі. Для локального кількісного елементного аналізу застосовували систему енергодисперсійного рентгенівського аналізу (EDX).

Мікротвердість за Вікерсом вимірювали на приладі ПМТ-3 при навантаженнях $P = 10\text{--}200$ г та часі витримки 7–10 с.

Металографічний аналіз вихідного стану зразків виявив кардинальну трансформацію зеренної структури при збільшенні вмісту вольфраму. Чисте залізо (рис. 1а) має типову литу структуру з крупними полієдричними зернами неправильної форми та розгалуженими границями; середній розмір зерна $d = 1,5$ мм. Характерна значна різнозернистість – поряд з великими зернами присутні

значно дрібніші.

Введення 0,5 ат.% W (рис. 1б) змінює картину: середній розмір зерна зменшується до 0,8 мм, форма зерен стає округлішою. Різнозернистість зберігається, проте частка дрібних зерен на фоні великих помітно зростає. При збільшенні концентрації до 1,0 та 1,5 ат.% W відбувається якісний стрибок: розмір зерна зменшується до 36 і 26 мкм відповідно (рис. 1в, г). Це зменшення у порівнянні з чистим залізом становить ~ 42 та ~ 58 разів відповідно. Зерна набувають правильної полієдричної форми, структура стає однорідною, різнозернистість практично зникає. Кількісні дані про розмір зерна зведені у таблиці 1.

Рентгенофазовий аналіз (рис. 2) підтвердив, що у всьому дослідженому концентраційному діапазоні вихідна структура сплавів Fe–W є однофазною: на дифрактограмах ідентифікуються виключно рефлекси ОЦК-решітки α -Fe. Жодних піків, що відповідали б інтерметалідним сполукам (Fe_7W_6 , Fe_2W , Fe_3W_2) або карбідам вольфраму, не зафіксовано – це свідчить про повне розчинення добавленого W у матриці заліза в умовах вакуумного сплавлення при досліджуваних концентраціях.

Водночас аналіз дифрактограм фіксує дві важливі тенденції зі збільшенням вмісту W: по-перше, зміщення всіх дифракційних піків у бік менших кутів 2θ , що свідчить про збільшення параметра кристалічної решітки **a** – пряма ознака входження атомів W ($r = 0,141$ нм) у вузли ОЦК-решітки Fe ($r = 0,124$ нм); по-друге, помітне розширення дифракційних піків при переході до 1,0 та 1,5 ат.% W, що вказує на зменшення розміру ОКР. Цей результат є принципово важливим: він свідчить, що при підвищенні концентрації W зменшення ОКР та збільшення **a** відбуваються одночасно, тобто W перебуває не виключно у твердому розчині, а частково концентрується на границях зерен, зменшуючи розмір кристалітів.

Для перевірки гіпотези про нерівномірний розподіл W між тілом зерна та міжзеренними границями виконано локальний EDX-аналіз у двох точках у зразку Fe–W (W $\sim 1,0$ ат.%) (рис. 3).

Отримані результати EDX-аналізу (табл. 2) узгоджуються з рентгенофазовими даними та можуть свідчити про переважну локалізацію атомів W на міжзеренних границях. Коефіцієнт збагачення $\beta = C_{GB} / C_{bulk} \approx 5,45$ для W якісно узгоджується з теоретичними прогнозами [6] та DFT-розрахунками [9].

Дослідження мікротвердості показало закономірне зростання цього параметра зі збільшен-

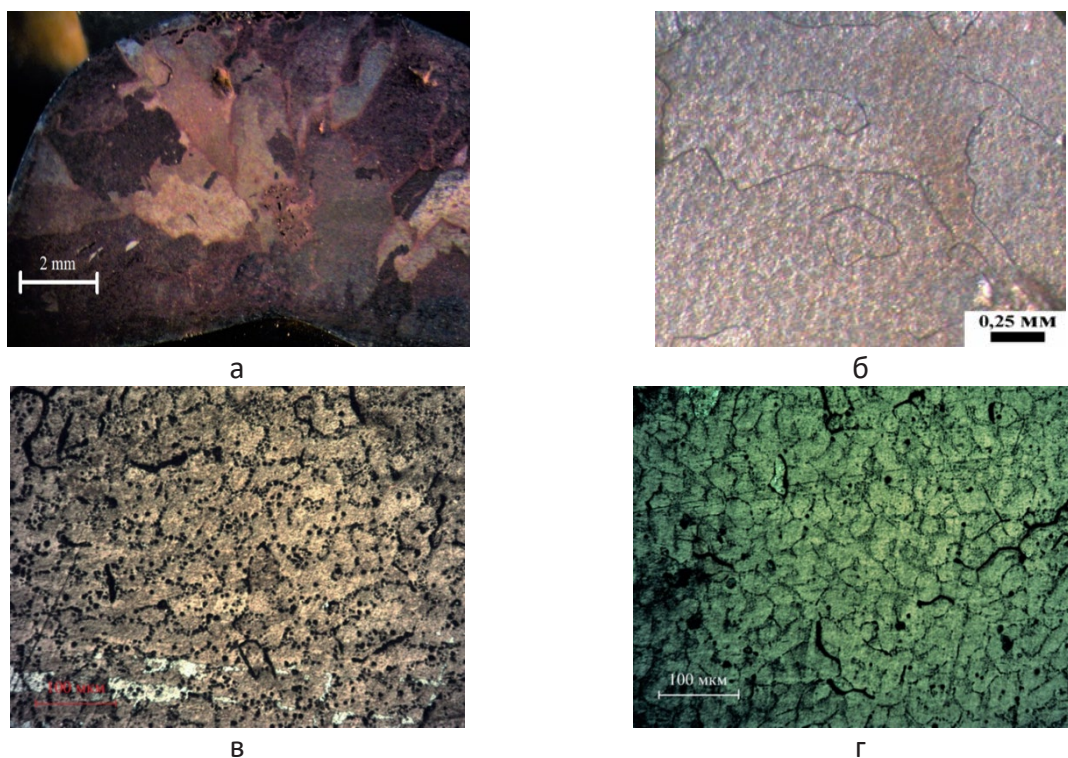


Рис. 1. Металографічні зображення мікроструктури Fe та сплавів Fe–W у вихідному стані: а) Fe; б) Fe–W (W ~ 0,5 ат. %); в) Fe–W (W ~ 1,0 ат. %); г) Fe–W (W ~ 1,5 ат. %)

Таблиця 1

Середній розмір зерна, ступінь подрібнення сплавів Fe–W

Вміст W, ат.%	Розмір зерна d	Подрібнення відносно Fe	Форма зерен
0	1,5 мм	1×	Неправильна
0,5	0,8 мм	~1,9×	Округла
1,0	36 мкм	~42×	Полієдрична
1,5	26 мкм	~58×	Правильна

Таблиця 2

Результати локального EDX-аналізу сплаву Fe–W (W ~ 1,0 ат.%)

Елемент	Тіло зерна, ат.%	Границя зерна, ат.%	Коефіцієнт збагачення β
Fe	97,1	84,2	0,87
W	2,9	15,8	5,45

ням вмісту вольфраму (рис. 4). При концентрації 0,5 ат. % W твердість підвищується приблизно на 200 МПа у порівнянні з чистим залізом. Оскільки розмір зерна при цьому змінився лише в 1,6 рази, основний внесок у підвищення твердості вносить механізм твердорозчинного зміцнення.

При додаванні 1,0 та 1,5 ат. % W розмір зерна порівняно з чистим залізом зменшується в 42 та 58 разів відповідно. Завдяки значному подрібненню зернової структури суттєво зростає частка зернограничного зміцнення, що призводить до збільшення твердості на 350 та 500 МПа відповідно. Отже, при малих концентраціях W домінує твердорозчинне зміцнення, а при збільшенні

вмісту W – зернограничне. Подальше підвищення властивостей міцності в цих сплавах можливе за рахунок дисперсійного зміцнення на вольфрам-місних виділеннях.

Сукупність отриманих даних дозволяє запропонувати цілісну фізичну картину модифікуючого впливу W. При кристалізації розплаву фронт кристалізації витісняє атоми W (великий атомний радіус 0,141 нм; обмежена розчинність ~1,7 ат. % у α -Fe при 900°C) до поверхні зростаючих зерен. Збагачений на W шар виконує роль адсорбційного бар'єру (механізм модифікатора 1-го роду): підвищує поверхневий натяг на границі розплаву–кристал, уповільнює дифузію атомів Fe до фронту

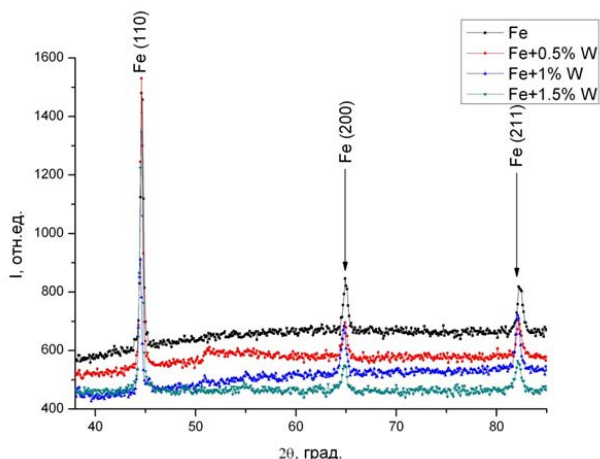


Рис. 2. Рентгенівський фазовий аналіз сплавів Fe та Fe-W

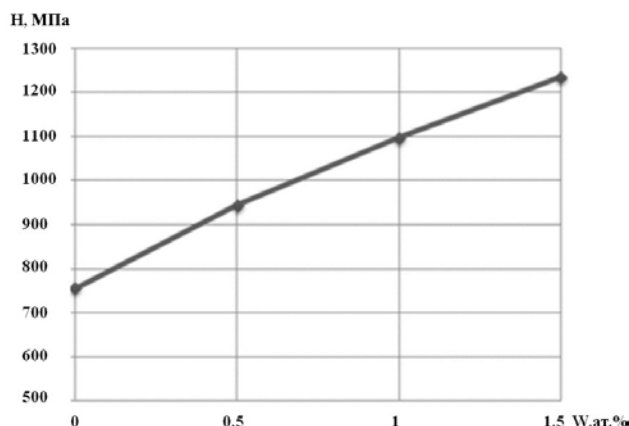


Рис. 4. Концентраційна залежність мікротвердості сплавів Fe-W

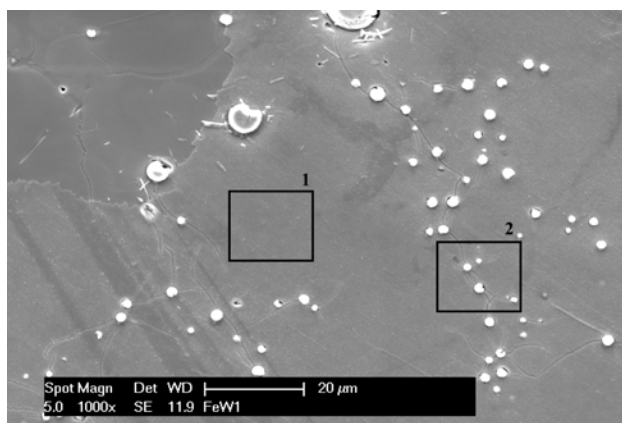


Рис. 3. Локальний EDX-аналіз сплаву Fe-1,0W: 1) у тілі зерна; 2) на границі зерна

і гальмує ріст зерен [2]. Після кристалізації збагачений шар залишається на міжзеренних границях у вигляді сегрегацій, що реєструється методом EDX.

Висновки.

1. Виявлено ефективний модифікуючий вплив вольфраму: введення 1,5 ат.% W у залізо зменшує середній розмір зерна у ~58 разів – з 1,5 мм до 26 мкм, змінюючи при цьому форму зерен від неправильної до правильної поліедричної та усуваючи різнозернистість структури.

2. Методом рентгенофазового аналізу встановлено, що у всьому дослідженому концентраційному діапазоні (0–1,5 ат.% W) сплави Fe-W

є однофазними (твердий розчин W у α -Fe). Зростання параметра решітки та розширення дифракційних піків зі збільшенням вмісту W свідчать про одночасне входження атомів W у твердий розчин та їх концентрування на міжзеренних границях.

3. EDX-аналіз підтвердив утворення зернограничних сегрегацій вольфраму: $\beta \approx 5,45$, вміст W на границі (~15,8 ат.%) перевищує значення в тілі зерна (~2,9 ат.%). Запропонований механізм модифікування – виштовхування атомів W фронтом кристалізації з формуванням адсорбційного бар'єру.

4. Показано, що зміцнення сплавів Fe-W реалізується послідовно за двома механізмами: при 0,5 ат.% W переважає твердорозчинне зміцнення, при 1,0–1,5 ат.% W домінує зернограничне зміцнення, що дає сумарний приріст мікротвердості 500 МПа відносно чистого заліза.

5. Отримані результати підтверджують перспективність концепції «сегрегаційної інженерії» для залізовмісних матеріалів і відкривають можливість розробки нових марок конструкційних сталей з підвищеними механічними характеристиками шляхом мікрولهгування тугоплавкими металами без застосування складних методів деформаційного зміцнення. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення термічної стабільності сегрегацій та поведінки сплавів під навантаженням при підвищених температурах.

Список літератури:

1. Cordero Z. C., Knight B. E., Schuh C. A. Six decades of the Hall-Petch effect: a survey of grain-size strengthening studies on pure metals. *International Materials Reviews*. 2016. Vol. 61, No. 8. P. 495–512. DOI: 10.1080/09506608.2016.1191808.
2. Stefanescu D. M. *Science and Engineering of Casting Solidification*. 3rd ed. Cham: Springer, 2015. 582 p. DOI: 10.1007/978-3-319-15693-4.

3. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V. A. et al. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*. 2022. Vol. 10, No. 4. P. 163–256. DOI: 10.1080/21663831.2022.2029779.
4. Cao Y., Ni S., Liao X., Song M., Zhu Y. Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2018. Vol. 133. P. 1–59. DOI: 10.1016/j.mser.2018.06.001.
5. Raabe D., Herbig M., Sandlöbes S. et al. Grain boundary segregation engineering in metallic alloys: a pathway to the design of interfaces. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2014. Vol. 18, No. 4. P. 253–261. DOI: 10.1016/j.cossms.2014.06.002.
6. Lejček P., Šob M., Paidar V. Interfacial segregation and grain boundary embrittlement: an overview and critical assessment. *Progress in Materials Science*. 2017. Vol. 87. P. 83–139. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.11.001.
7. Mai H. L., Cui X.-Y., Hickel T. et al. A high-throughput ab initio study of elemental segregation and cohesion at ferritic-iron grain boundaries. *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2503.05640>
8. Chen X., Gonçalves W., Hu Y. et al. Secondary grain boundary dislocations alter segregation energy spectra. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. P. 8422. DOI: 10.1038/s41467-025-64265-6.
9. Chookajorn T., Schuh C. A. Thermodynamics of stable nanocrystalline alloys: a Monte Carlo analysis. *Physical Review B*. 2014. Vol. 89, No. 6. P. 064102. DOI: 10.1103/PhysRevB.89.064102.
10. Schuh C. A., Lu K. Stability of nanocrystalline metals: the role of grain-boundary chemistry and structure. *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 46, No. 3. P. 225–235. DOI: 10.1557/s43577-021-00055-x.
11. Zhang R., Zhao S., Ding J. et al. Short-range order and its impact on the CrCoNi medium-entropy alloy. *Nature*. 2020. Vol. 581. P. 283–287. DOI: 10.1038/s41586-020-2275-z.

Barmin O.Ye. EFFECT OF TUNGSTEN ON THE GRAIN STRUCTURE AND PROPERTIES OF IRON-BASED ALLOYS

The article presents a comprehensive study of the effect of small tungsten additions (0.5; 1.0; 1.5 at.%) on the grain structure and mechanical properties of polycrystalline Fe–W alloys produced by vacuum melting. The growing scientific and practical interest in ultrafine-grained iron-based materials is driven by their unique combination of enhanced strength, ductility, and impact toughness while maintaining satisfactory workability. The research methodology included: metallographic analysis using a MIM-7 microscope; X-ray phase analysis on a DRON-4 diffractometer (CuK α radiation, $\lambda = 0.15406$ nm); scanning electron microscopy with local EDX analysis; and Vickers microhardness measurements on a PMT-3 tester at loads of 10–200 g. It was established that the initial structure of all studied alloys is single-phase – a solid solution of W in α -Fe – with no traces of intermetallic compounds or carbides. An effective grain-refining effect of tungsten on grain structure was identified: the addition of 1.5 at.% W reduces the average grain size approximately 58-fold – from 1.5 mm to 26 μ m – with a change in grain shape from irregular to regular polyhedral. EDX analysis confirmed the formation of grain boundary segregations: the W content at the grain boundary (~15.8 at.%) exceeds its value within the grain body (~2.9 at.%) by a factor of 5.45, indicating the rejection of W atoms by the crystallisation front. The concentration dependence of microhardness demonstrates a monotonic increase from ~750 MPa for pure iron to ~1250 MPa for Fe–1.5W. Analysis of strengthening showed that at 0.5 at.% W, solid solution strengthening dominates, whereas at 1.0–1.5 at.% W, grain boundary strengthening becomes dominant. A grain refinement mechanism via grain boundary segregation of the refractory component during crystallisation is proposed. The results obtained are practically significant for the development of structural iron-based materials through micro-alloying with refractory metals.

Keywords: modification, tungsten, iron, grain structure, grain boundary segregation, microhardness, X-ray phase analysis, solid solution strengthening.

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 678:617:615.4(076.5)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/26>**Єфіменко О.В.**<https://orcid.org/0009-0009-9273-539X>

Публічне акціонерне товариство «Національна акціонерна компанія «Нафтогаз України»

ВИЗНАЧЕННЯ КОМПОНЕНТНОГО СКЛАДУ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БІОМЕТАНУ ХРОМАТОГРАФІЧНИМ МЕТОДОМ

Стаття присвячена перспективам розвитку виробництва біометану в Україні та методам оцінки його якісних характеристик. Розглянуто вимоги нормативних документів щодо складу, фізико-хімічних та енергетичних показників біометану. Наголошено, що для безпечної інтеграції в газотранспортну систему та ефективного використання в енергетичних установках необхідне точне визначення цих показників, що забезпечує надійну експлуатацію обладнання та сприяє масштабуванню виробництва.

У роботі детально проаналізовано переваги хроматографічного методу для визначення компонентного складу біометану. Зокрема, метод дозволяє точно оцінювати фізико-хімічні показники, що забезпечує надійність і достовірність отриманих результатів.

Результати експериментальних досліджень показали, що досліджений методом хроматографії виготовлений виробниками України біометан за своїми фізико-хімічними характеристиками відповідає нормативно-правовим актам, що регулюють питання якості природного газу в Україні. Найкращі результати щодо дотримання значень вищої теплоти згоряння на рівні 36,20 МДж/м³ досягається за концентрації метану на рівні 97,6 % мол. і вище. Окремо описано методи підвищення теплоти згоряння біометану, що дозволяють оптимізувати його енергетичні властивості для ефективного використання в енергетичному секторі.

Проаналізовано основні джерела утворення біогазу, запропоновано класифікацію та охарактеризовано різновиди сировини, яка може ефективно використовуватися для виробництва біометану. Значну увагу приділено праву виробників біометану на отримання доступу до газотранспортних і газорозподільних систем, газосховищ, установок LNG. Наведено основні переваги виробництва і використання біометану як відновлювального джерела енергії. Окреслено економічні, екологічні та стратегічні можливості, які відкриває розвиток цього виду палива, зокрема зменшення енергетичної залежності, стимулювання експорту та декарбонізацію енергетичного сектору.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, біогаз, оновлення біогазу, біометан, фізико-хімічні показники, газова хроматографія, енергетичні показник.

Постановка проблеми. На даний час, основною тенденцією розвитку сучасного енергетичного сектора є поступовий перехід до відновлюваних джерел енергії, серед яких важливе місце посідає біометан – екологічно чистий газоподібний енергоносіє, отриманий шляхом оновлення біогазу до складу, подібного за характеристиками до природного газу. Біометан, як і природний газ за своїми фізико-хімічними властивостями має відповідати вимогам чинних нормативно-правових актів для його подачі до газотранспортної або газорозподільної системи [1-2].

Недостатній контроль якості на етапах виробництва та транспортування може призвести до подачі в мережу газу, що не відповідає нормам, створюючи технічні ризики та загрозу аварій.

Якість біометану є критичним фактором, що визначає можливість його безпечного та ефективного використання в енергетичному секторі, транспортній галузі та у системах газорозподілу. Незважаючи на значний потенціал цього енергоносія, процес його виробництва пов'язаний із низкою технологічних та організаційних викликів,



які впливають на кінцеві фізико-хімічні характеристики продукту.

Однією з ключових проблем є варіативність складу сирого біогазу, яка залежить від типу та походження субстратів, умов анаеробного зброджування, параметрів роботи біореакторів та стабільності мікробіологічних процесів. Ці чинники впливають на концентрацію метану, вміст діоксиду вуглецю, сірководню, аміаку та інших домішок, що потребують ретельного очищення.

Наступним важливим аспектом є недосконалість або недостатня ефективність технологій апгрейдингу, спрямованих на вилучення домішок та доведення біометану до стандартів природного газу. Високий рівень залишкового CO_2 , H_2S , водяної пари чи силосанів може зумовлювати корозійні процеси, пошкодження газового обладнання, зниження теплоти згоряння та загальну нестабільність роботи газотранспортних систем.

Не менш суттєвою є проблема недостатності стандартизації та контролю якості в деяких країнах чи регіонах. Невідповідність нормативам, зокрема щодо теплоти згоряння, тиску пари, вмісту кисню та механічних домішок, створює ризики для інтеграції біометану в існуючі інфраструктури. Такі розбіжності можуть призвести до технологічних збоїв, зниження енергоефективності системи та загроз екологічній безпеці.

Актуальність визначення компонентного складу та фізико-хімічних показників біометану зростає в умовах глобальної енергетичної трансформації та розвитку відновлюваних джерел енергії в Україні. Біометан є перспективним альтернативним газовим ресурсом, здатним частково замінювати традиційний природний газ у промислових, комунальних та енергетичних системах, сприяючи зниженню викидів парникових газів та підвищенню енергетичної безпеки країни. Його ефективне використання можливе лише за умови точного визначення компонентного складу та фізико-хімічних характеристик, що впливають на енергетичні показники, такі як вища теплота згоряння, склад газових домішок, а також безпеку експлуатації обладнання.

Хроматографічний метод дослідження газових сумішей є одним із найнадійніших і точних способів визначення складових компонентів біометану. Він дозволяє контролювати концентрацію основних і допоміжних газів, що входять до складу біометану, а також оцінювати параметри, критичні для його енергетичної ефективності та відповідності нормативним вимогам до природного газу. Надійний контроль фізико-хімічних

показників є необхідною умовою для інтеграції біометану у газотранспортну систему та використання його в енергетичних установках без ризику пошкодження обладнання і зниження ефективності процесів.

Важливим аспектом масштабного впровадження біометану є забезпечення виробників доступом до існуючих газотранспортних мереж. Це дозволяє ефективно транспортувати та змішувати біометан із природним газом, забезпечувати стабільність постачання та дотримання встановлених стандартів якості. У свою чергу, точний аналіз компонентного складу та фізико-хімічних показників газу дозволяє оптимізувати енергетичні властивості біометану, підвищуючи його теплоту згоряння та енергетичну цінність.

Основні проблеми біометану пов'язані з нестабільністю якості газу, яка може варіюватися залежно від складу сировини та ефективності технологій очищення, що ускладнює його інтеграцію у газотранспортні мережі [2-4].

Сукупність зазначених факторів формує комплексну проблему забезпечення стабільної та високої якості біометану. Її вирішення потребує вдосконалення технологічних процесів очищення, підвищення рівня контролю параметрів продукції, гармонізації стандартів та впровадження сучасних систем моніторингу в режимі реального часу.

Таким чином, комплексне вирішення проблеми визначення компонентного складу та фізико-хімічних характеристик біометану є ключовим для розвитку ринку альтернативних газових ресурсів в Україні. Поеднання надійного контролю якості газу з можливістю доступу виробників до газових мереж забезпечує безпечне, ефективне та масштабне використання біометану у промисловому секторі та енергетиці, сприяючи підвищенню енергетичної незалежності та впровадженню стійких технологій відновлюваної енергетики.

Тому комплексні дослідження, спрямовані на визначення показників якості біометану, є вкрай актуальними, оскільки вони забезпечують контроль його фізико-хімічних та енергетичних характеристик, гарантують безпечне використання в газотранспортних системах і енергетичних установках, а також сприяють збільшенню виробництва цього альтернативного енергоресурсу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасна енергетика орієнтована на впровадження відновлюваних джерел енергії, серед яких особливе значення має біометан. Використання біометану забезпечує суттєве скорочення викидів парникових газів завдяки заміщенню викопного

природного газу та запобіганню неконтрольованому розкладу органічних відходів. Переробка біомаси у біометан дозволяє раціонально утилізувати аграрні, харчові та комунальні відходи, перетворюючи їх на високоякісне паливо. Це, у свою чергу, підвищує енергетичну автономність держави, зменшуючи залежність від імпортованих енергоносіїв та зміцнюючи національну енергетичну безпеку[5].

Ключовими перевагами розвитку виробництва біометану є:

- *Енергетична відновлюваність*: біометан отримується з органічних відходів (сільськогосподарських, харчових, побутових), що робить його відновлюваним джерелом енергії.

- *Зниження викидів парникових газів*: використання біометану замість природного газу дозволяє скоротити викиди CO₂, CH₄ та інших шкідливих газів, що сприяє боротьбі з глобальним потеплінням.

- *Екологічна безпека*: переробка органічних відходів у біометан зменшує накопичення відходів, запобігає забрудненню ґрунту й води.

- *Енергетична незалежність*: виробництво біометану на місцевому рівні знижує залежність від імпорту природного газу, що особливо актуально для України.

- *Економічна вигідність*: створення біометанових установок сприяє розвитку місцевого бізнесу та нових робочих місць, а також підвищує ефективність сільськогосподарських відходів.

- *Стабільність і сумісність*: біометан має подібні фізико-хімічні

властивості до природного газу, що дозволяє інтегрувати його у існуючі газотранспортні мережі та використовувати у звичайних газових установках без значних модифікацій.

- *Можливість використання біогазового осаду*: після виробництва біометану залишається біогазовий осад, який можна застосовувати як високоякісне органічне добриво.

Біометан розглядається як паливо майбутнього завдяки своїй відновлюваній природі та екологічній безпеці, однак для його ефективного використання необхідно суворо контролювати технологічні процеси виробництва. Забезпечення стабільної якості газу є критично важливим для безпечного та надійного підключення біометану до газових мереж і підтримки стабільності енергетичної системи [7].

Постановка завдання. Метою даної роботи є комплексне дослідження фізико-хімічних властивостей біометану, а саме: визначення густини,

відносної густини, вищої та нижчої теплоти згоряння, числа Воббе та оцінка відповідності отриманих параметрів чинним нормативно-правовим актам, що регламентують показники якості природного газу для його подачі до газотранспортних і газорозподільних систем. Отримані результати спрямовані на забезпечення безпечного та ефективного використання біометану в енергетичному секторі та науково обґрунтовану інтеграцію цього відновлюваного енергоносія в сучасні газові мережі.

Виклад основного матеріалу. Сучасні дослідження свідчать про активне зростання виробництва біометану в Україні, що зумовлено необхідністю диверсифікації енергоресурсів та зниження викидів парникових газів. Основними напрямками розвитку є пошук та використання ефективної сировини, підвищення якості біогазу до рівня біометану та його інтеграція в існуючі газові мережі.

Водночас інтенсифікація виробництва біометану ставить нові технологічні та експлуатаційні виклики. Зокрема, критичним є забезпечення безперебійного постачання та підготовки сировини з урахуванням її біохімічного складу та енергетичного потенціалу. Значна увага приділяється технологіям очищення та підвищення якості газу, зокрема застосуванню сорбентів, мембранних систем та багатоступеневих фільтраційних процесів для видалення механічних домішок, сірководню та інших небажаних компонентів. Додатково важливо контролювати показники теплоти згоряння, масову концентрацію сірководню та меркаптанової сірки, вміст вологи, точку роси за вологою та вуглеводнями, концентрацію летких вуглеводнів для забезпечення відповідності біометану діючим нормативним та технічним стандартам [7-8].

Для виробництва біометану використовується різноманітна органічна сировина, включно з сільськогосподарськими відходами (гній, силосна маса, стебла та листя рослин), харчовими та промисловими відходами, а також спеціально вирощеними енергетичними культурами. Ключовими критеріями відбору сировини є стабільна доступність та оптимальні показники вологи для ефективного анаеробного бродіння. Використання різних типів сировини дозволяє забезпечити стабільність виробництва біометану. Основні види сировини при виробництві біометану наведено на рисунку 1.

Склад та характеристики сировини безпосередньо впливають на якість отриманого біометану. Різні типи органічної сировини визначають

співвідношення метану та вуглекислого газу, вміст сірководню та інших домішок, а також рівень вологості, що, у свою чергу, впливає на ефективність очищення та стабільність теплоти згоряння. Тому важливо забезпечити контроль фізико-хімічних параметрів біометану.

Продуктами біогазової технології є газова фаза, представлена біогазом, що складається переважно з метану та вуглекислого газу, та очищений біометан, придатний для використання як паливо або подачі в газові мережі (рис. 2). Рідко-тверді відходи процесу включають дигестат, бага-

тий на поживні речовини, який використовується як органічне добриво, та його рідку і тверду фази, що можуть застосовуватися для удобрення ґрунтів або виробництва біоматеріалів.

В Україні біогаз активно використовується для виробництва електроенергії на біогазових установках, що сприяє локалізованому енергозабезпеченню та зменшенню викидів парникових газів. Окрім прямого спалювання, частина біогазу після очищення перетворюється на біометан, який може закачуватися в газові мережі для подальшого використання у комунальній та промисловій енер-



Рис. 1. Сировина для виробництва біогазу

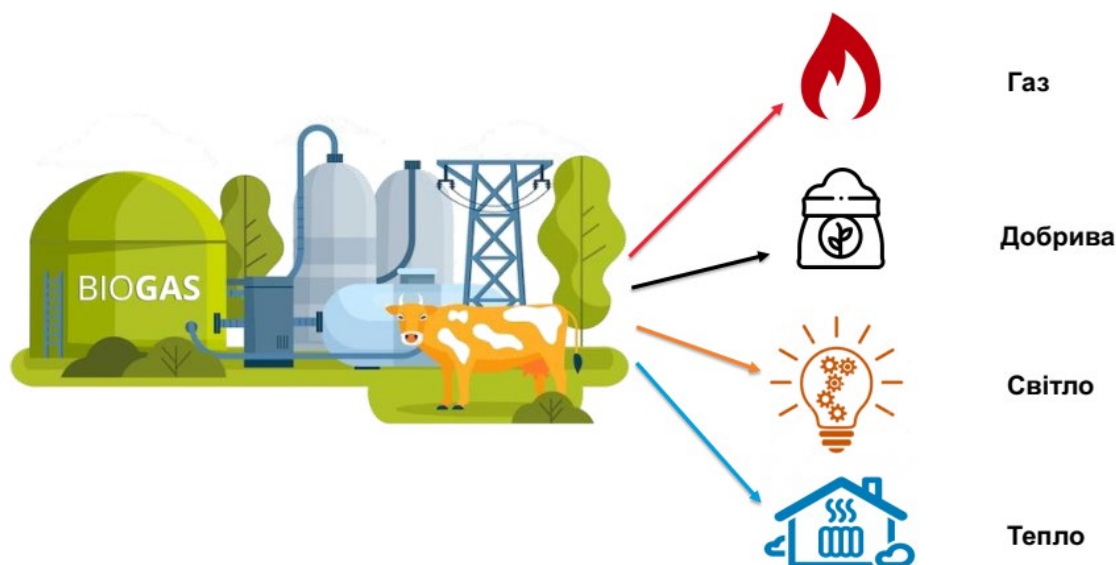


Рис.2. Продукти біогазової технології

гетиці (рис. 3). Такий підхід забезпечує гнучкість енергетичної системи та інтеграцію відновлюваних джерел енергії у національну інфраструктуру.

Основним документом, що регламентує вимоги до якості та фізико-хімічних показників біометану в Україні, є Кодекс газотранспортної системи.

Цей Кодекс розроблено відповідно до Законів України «Про ринок природного газу», «Про метрологію та метрологічну діяльність», «Про трубопровідний транспорт», «Про нафту і газ», «Про природні монополії» та інших нормативно-правових актів. Кодекс є регламентом функціонування газотранспортної системи України та визначає правові, технічні, організаційні та економічні засади функціонування газотранспортної системи України [1, 8].

Дія цього Кодексу поширюється на всіх суб'єктів ринку природного газу України: операторів суміжних систем, газовидобувні підприємства, у тому числі виробників біометану, замовників, споживачів та постачальників природного газу незалежно від підпорядкування та форми власності, а також операторів торгових платформ. Він встановлює параметри газу, які мають бути дотримані для його приймання та транспортування у ГТС. Саме відповідність цим нормам дозволяє закачувати біометан до магістральної газової мережі. В ньому наведено визначення терміну *біометан* – це біогаз, що за своїми фізико-хімічними характеристиками відповідає вимогам нормативно-правових актів до природного газу для подачі до газотранспортної або газорозподільної системи.

Кодекс газотранспортної системи регламентує:

- вимоги до якості газу, що подається до ГТС;
- фізико-хімічні показники, яким повинен відповідати газ (у тому числі

біометан) для закачування у магістральну газотранспортну мережу;

- правила доступу та взаємодії учасників ринку газу з оператором ГТС;
- процедури вимірювання, контролю та перевірки параметрів газу.

У контексті біометану, саме Кодекс ГТС визначає, до яких стандартів цей газ має бути доведений після очищення, щоб стати еквівалентом природного газу та мати можливість бути прийнятим оператором у систему.

Згідно Кодексу ГТС, для точок входу і точок виходу визначаються такі значення фізико-хімічних показників (ФХП):

- компонентний склад;
- нижча та вища теплота згоряння;
- густина газу;
- вміст сірководню та меркаптанової сірки;
- вміст механічних домішок;
- число Воббе;
- температура точки роси за вологою;
- температура точки роси за вуглеводнями.

Слід зазначити, що виробники біометану або інших видів газу з альтернативних джерел мають право на отримання доступу до газотранспортних і газорозподільних систем, газосховищ, установки LNG та на приєднання до газотранспортних та газорозподільних систем за умови дотримання технічних норм та стандартів безпеки

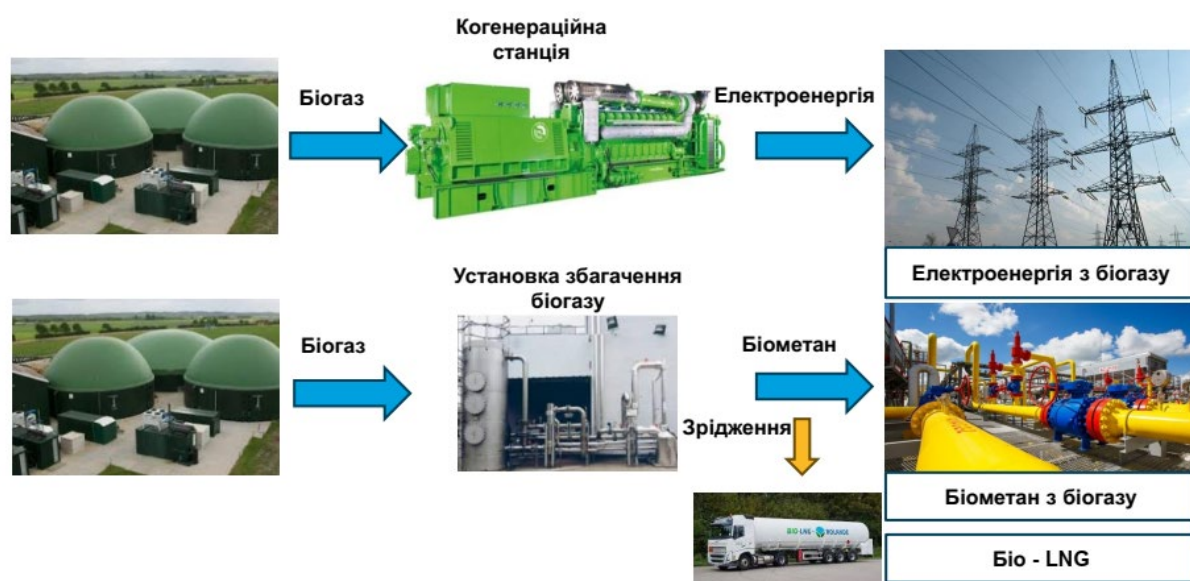


Рис. 3. Використання біогазу в Україні

відповідно до законодавства та за умови, що біометан або інші види газу з альтернативних джерел за своїми фізико-хімічними характеристиками відповідають нормативно-правовим актам, що регулюють питання якості природного газу.

Відповідно до умов Кодексу ГТС, природний газ, що подається в газотранспортну систему, повинен відповідати таким вимогам:

Якщо біометан не відповідатиме встановленим Кодексом показникам якості, його подача до газових мереж буде заборонена. Саме тому питання точного та комплексного контролю якості кінцевого продукту набуває особливої важливості [1-10].

Виклад основного матеріалу. Вивчення фізико-хімічних показників біометану є надзвичайно важливим для забезпечення його ефективного та безпечного використання у газотранспортних та газорозподільних системах. Хроматографічний метод аналізу у цьому контексті є найбільш доцільним, оскільки забезпечує високу точність, чутливість та відтворюваність результатів при визначенні складу складних газових сумішей. Завдяки хроматографії можливо окремо ідентифікувати основні та слідові компоненти біометану, що дозволяє не лише оцінювати його загальні фізико-хімічні властивості, але

й прогнозувати поведінку газу при спалюванні та транспортуванні.

Особливу увагу слід приділяти контролю теплоти згоряння біометану. Цей показник є ключовим для визначення енергетичної цінності газу, його ефективності у промислових і енергетичних установках та безпечності експлуатації. Високоточне визначення теплоти згоряння дозволяє уникнути недо- або перевитрати енергії, забезпечує стабільність роботи котлів і турбін та запобігає аварійним ситуаціям, пов'язаним із неконтрольованим горінням.

Значення теплоти згоряння ідеального газу, обчислене на основі значень об'ємної частки компонентів, для температури згоряння t_1 суміші відомого складу, вимірених за температури t_2 і тиску p_2 , обчислюють за рівнянням:

$$\hat{H}_o = H \times \frac{p_2}{R \times T_2}, \text{ (МДж/м}^3\text{)},$$

де H – значення ідеальної об'ємної теплоти згоряння суміші;

$R = 8,314510 \text{ (Дж/моль} \times \text{К)}$ – універсальна газова стала; $p_2 = 101,325 \text{ кПа}$;

$T_2 = (t_2 + 273,15)$ – абсолютна температура.

При переході від ідеального до реального газу розрахунок об'ємної теплоти згоряння

вміст метану (C_1), мол. %	мінімум	90
вміст етану (C_2), мол. %	максимум	7
вміст пропану (C_3), мол. %	максимум	3
вміст бутану (C_4), мол. %	максимум	2
вміст пентану та інших більш важких вуглеводнів (C_5+), мол. %	максимум	1
вміст азоту (N_2), мол. %	максимум	5
вміст вуглецю (CO_2), мол. %	максимум	2
вміст кисню (O_2), мол. %	максимум	0,2
вища теплота згоряння (25 °C/20 °C)		
мінімум		36,20 МДж/м ³ (10,06 кВт·год/м ³)
максимум		38,30 МДж/м ³ (10,64 кВт·год/м ³)
вища теплота згоряння (25 °C/0 °C)		
мінімум		38,85 МДж/м ³ (10,80 кВт·год/м ³)
максимум		41,10 МДж/м ³ (11,42 кВт·год/м ³)
нижча теплота згоряння (25 °C/20 °C)		
мінімум		32,66 МДж/м ³ (09,07 кВт·год/м ³)
максимум		34,54 МДж/м ³ (09,59 кВт·год/м ³)
температура точки роси за вологою °C		
при абсолютному тиску газу 3,92	МПа	не перевищує мінус 8 (-8)
температура точки роси за вуглеводнями		
при температурі газу не нижче 0 °C		не перевищує 0°C
вміст механічних домішок:		відсутні
вміст сірководню, г/м ³		максимум 0,006
вміст меркаптанової сірки, г/м ³		максимум 0,2

$\hat{H} [t_1, V(t_2, p_2)]$ проводять за ДСТУ ISO 6976 :

$$\hat{H} [t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\hat{H}_0}{Z_{mix}(t_2, p_2)}, \text{ (МДж/м}^3\text{)},$$

де $\hat{H}_0$ – значення ідеальної об'ємної теплоти згоряння суміші;

$Z_{mix}(t_2, p_2)$ – фактор стисливості газової суміші розраховується за рівнянням :

$$Z_{mix}(t_2, p_2) = 1 - \left[\sum_{j=1}^N X_j \times \sqrt{b_j} \right]^2,$$

де b_j – коефіцієнт підсумовування.

Крім теплоти згоряння, хроматографічний аналіз дає можливість точно оцінювати густину, відносну густину та число Воббе, що безпосередньо впливають на сумісність біометану з існуючими газотранспортними системами та визначають його придатність для подачі у споживчі мережі. Контроль цих параметрів забезпечує відповідність газу нормативно-правовим вимогам щодо якості природного газу та дозволяє прогнозувати його поведінку при змішуванні з природним газом або іншими видами біогазу.

Порівняно з іншими методами аналізу, хроматографія вирізняється комплексністю та точністю, що робить її оптимальним інструментом для оцінки фізико-хімічних властивостей біометану. Вона дозволяє одночасно визначати велику кількість компонентів, що значно підвищує достовірність даних у порівнянні з простими фізико-хімічними методами, які можуть лише оцінювати окремі параметри газу.

Таким чином, застосування хроматографічного методу для комплексного дослідження фізико-хімічних показників біометану є обґрунтованим і необхідним для:

- забезпечення високої точності та відтворюваності результатів;
- контролю енергетичної цінності газу через визначення теплоти згоряння;
- оцінки придатності газу для транспортування та подачі у газотранспортні та газорозподільні системи;
- підтвердження відповідності нормативно-правовим актам щодо якості природного газу;
- підвищення безпеки та ефективності його використання у промислових і енергетичних процесах [11-13].

З огляду на вищезазначене, хроматографічне дослідження фізико-хімічних показників біометану є ключовим етапом у забезпеченні стабільного, безпечного та ефективного використання відновлюваних газових ресурсів.

Для визначення компонентного складу відібраних проб біометану використовували газові хроматографи Agilent (рис. 4).

Газовий хроматограф Agilent розділяє компоненти суміші завдяки їхній різній взаємодії з колонкою при заданому температурному режимі. Детектор фіксує вихід кожної речовини, а система обробки даних формує хроматограму та обчислює кількість кожного компонента. Метод розділення заснований на різній адсорбції компонентів аналізованої суміші на межі розділу двох незмішуваних фаз. Причому одна фаза рухома – газ, інша нерухома – сорбційний матеріал.

Основними етапами проведення визначення фізико-хімічних показників

відібраних проб біометану були:

- введення зразка проби;
- перенесення газом-носієм;
- розділення в колонці;

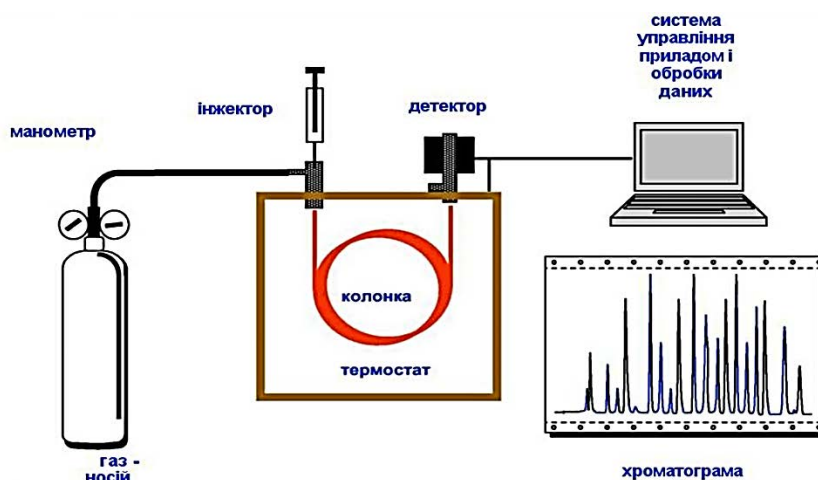


Рис.4. Принцип роботи газового хроматографа Agilent

- детектування;
- аналіз результатів.

Визначення компонентного складу відбувалося згідно з вимогами стандарту ДСТУ ISO 6974 «Природний газ. Визначення компонентного складу із заданою невизначеністю методом газової хроматографії», розрахунок фізико-хімічних показників – згідно вимог вимогам стандартів ДСТУ ISO 6976 «Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини та числа Воббе на основі компонентного складу».

Результати визначення фізико-хімічних показників відібраної проби №1, та №2 біометану наведено в Протоколі аналізування газу – таблиця 1.

Аналіз отриманих результатів показав, що проба біометану №1 та проба біометану №2 за фізико - хімічними показниками відповідає вимо-

гам Кодексу газотранспортної системи та може транспортуватися газовими мережами України – таблиця 2.

За результатами визначення фізико-хімічних показників встановлено, що отриманий біометан повністю відповідає вимогам Кодексу ГТС щодо якісних параметрів.

Детальний аналіз підтверджує, що його компонентний склад знаходиться в межах нормативно допустимих значень і не містить відхилень від регламентованих показників.

Крім того, визначена вища теплота згоряння свідчить про відповідність біометану енергетичним критеріям, необхідним для подачі в газотранспортну систему.

Висновки. Розвиток виробництва біометану в Україні є стратегічно важливим напрямом для

Таблиця 1

Протокол аналізування газу №1 та №2

1 Компонентний склад газу, визначений хроматографічним методом за ДСТУ ISO 6974				
№	Компонент	Формула	Проба №1 вміст, % мол.	Проба №2 вміст, % мол.
1	Метан	CH ₄	97,7388	99,3524
2	Етан	C ₂ H ₆	0,000	0,000
3	Пропан	C ₃ H ₈	0,000	0,000
4	н -Бутан	n-C ₄ H ₁₀	0,000	0,000
5	ізо -Бутан	i-C ₄ H ₁₀	0,000	0,000
6	н -Пентан	neo-C ₅ H ₁₂	0,000	0,000
7	ізо -Пентан	i-C ₅ H ₁₂	0,000	0,000
8	нео -Пентан	n-C ₅ H ₁₂	0,000	0,000
9	Гексан	C ₆ H ₁₄	0,000	0,000
10	Азот	N ₂	1,3232	0,5715
11	Кисень	O ₂	0,0760	0,0457
12	Діоксид вуглецю	CO ₂	0,8619	0,0303
2 Фізико-хімічні показники, розраховані за ДСТУ ISO 6976				
	Фізико-хімічний показник газу (при 20 °C та 101,325 кПа)	Значення		
	Густина відносна		0,5690	0,5577
	Густина абсолютна, кг/м ³		0,6854	0,6717
			МДж/м ³	МДж/м ³
	Теплота згоряння нижча		32,68	33,21
	Теплота згоряння вища		36,26	36,86
	Число Воббе вище		48,07	49,35

Таблиця 2

Відповідність фізико-хімічних показників біометану вимогам Кодексу газотранспортної системи

Показник	Проба №1	Проба №2	Вимоги Кодексу ГТС	Результат відповідає/не відповідає
Метан, % мол.	97,7388	99,3524	мінімум 90	відповідає
Азот, % мол.	1,3232	0,5715	максимум 5	відповідає
Кисень, % мол.	0,0760	0,0457	максимум 0,2	відповідає
Діоксид вуглецю, % мол.	0,8619	0,0303	максимум 2	відповідає
Теплота згоряння вища, МДж/м ³	36,26	36,86	мінімум 36,20	відповідає

підвищення енергетичної незалежності держави, зменшення залежності від імпортованих енергоресурсів та формування стійкої низьковуглецевої економіки. Біометан, як відновлюваний газовий енергоносіє, має значний потенціал для інтеграції в національну газотранспортну систему, забезпечуючи стабільне та екологічно чисте джерело енергії.

Ключовим елементом розвитку цієї галузі є систематичний контроль фізико-хімічних показників біометану. Висока точність і регулярність таких вимірювань гарантують безпечну експлуатацію інфраструктури, оптимальну роботу обладнання та відповідність продукції вимогам сучасного ринку енергоносіїв.

Забезпечення відповідності біометану нормативам Кодексу ГТС України є необхідною умовою його подачі до газотранспортної системи, оскільки саме ці стандарти регламентують якість газу. Результати визначення фізико-хімічних параметрів відібраних проб підтвердили високу якість виробленого біометану підприємствами України.

Таким чином, розвиток біометанового сектору в Україні має не лише економічне та екологічне значення, але й вимагає створення ефективної системи контролю якості продукції. Дотримання фізико-хімічних стандартів і забезпечення відповідності Кодексу ГТС є фундаментальною умовою інтеграції біометану у національну газову інфраструктуру та подальшого масштабування його виробництва

Список літератури:

1. Кодекс газотранспортної системи України (ГТСУ). Наказ НКРЕКП № 2490 від 18.12.2015. 210 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text> (дата звернення: 03.03.2026).
2. Братичак М. М. Хімія нафти та газу: навч. посіб. / М. М. Братичак, В. М. Гунька. Національний університет «Львів. політехніка», 2017. 448 с.
3. Pavićić J., Novak Mavar, K.; Brkić V., Simon, K. Biogas and Biomethane Production and Usage: Technology Development, Advantages and Challenges in Europe. *Energies* 2022, 15, 2940. <https://doi.org/10.3390/en15082940>
4. Георгій Гелетуша, Юрій Матвеев, Петро Кучерук, Семен Драгнев, Володимир Крамар. Виробництво передового біометану з лігноцелюлозної сировини: Аналітична записка №2. Київ: Біоенергетична асоціація України (UABIO), 2025. URL: <https://uabio.org/materials/18274/> (дата звернення 01.03.2026).
5. Gustafsson M., Anderberg S. Biogas policies and production development in Europe: A comparative analysis of eight countries. *Biofuels*. 2022. T. 13. №. 8. С. 931-944. <https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2034380>
6. Shen Y., Linville J. L., Urgun-Demirtas M., Mintz M. M. & Snyder S. W. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (2021 update). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 146. P. 111099. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111099.
7. Wang Y., Zhang Y., Wang J. & Meng L. Effects of volatile fatty acid concentrations on methane yield and methanogenic bacteria. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 168. P. 330–339. DOI: 10.1016/j.renene.2020.12.067.
8. Calise F., Cappiello F. L., Dentice d'Accadia M. & Vicidomini M. Biogas upgrading technologies and biomethane utilization: A review. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 1378. DOI: 10.3390/en15041378.
9. Mao C., Feng Y., Wang X. & Ren G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Fuel*. 2022. Vol. 324. P. 124457. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124457.
10. Khoshnevisan B., Duan N., Tsapekos P., Awasthi M. K. & Angelidaki I. A critical review on livestock manure biorefinery technologies: Sustainability and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 169. P. 112930. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112930.
11. Thrän D., Billig E., Persson T. & Svensson M. Biomethane status and potential in Europe: A review of data, technologies and policies. *Energy, Sustainability and Society*. 2023. Vol. 13. P. 1–20. DOI: 10.1186/s13705-023-00377-5.
12. Yang Z., Zhang Y., Li J. & Zhang X. Advances in biogas upgrading technologies: Membrane separation, adsorption and biological methods. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 430. P. 139625. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139625.
13. Singh A., Rathore D., Pant D. & Tyagi V. K. Recent developments in biogas upgrading to biomethane: A review of purification technologies and applications. *Bioresource Technology*. 2024. Vol. 389. P. 129746. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.129746.

Yefimenko O.V. DETERMINATION OF THE COMPONENT COMPOSITION

AND PHYSICO-CHEMICAL INDICATORS OF BIOMETHANE BY CHROMATOGRAPHIC METHOD

The article is devoted to the prospects for the development of biomethane production in Ukraine and methods for assessing its quality characteristics. The requirements of regulatory documents regarding the composition, physicochemical, and energy parameters of biomethane are considered. It is emphasized that for

safe integration into the gas transmission system and efficient use in energy installations, accurate determination of these parameters is necessary, ensuring reliable equipment operation and facilitating production scaling.

The paper provides a detailed analysis of the advantages of the chromatographic method for determining the component composition of biomethane. In particular, this method allows for precise evaluation of physicochemical parameters, ensuring the reliability and accuracy of the obtained results.

The results of experimental studies showed that biomethane produced by Ukrainian manufacturers and analyzed using chromatography meets the regulatory requirements governing natural gas quality in Ukraine in terms of its physicochemical characteristics. The best results in maintaining the higher heating value at the level of 36.20 MJ/m³ are achieved at a methane concentration of 97.6 mol% and above. Methods for increasing the calorific value of biomethane are also described, allowing optimization of its energy properties for efficient use in the energy sector.

The main sources of biogas formation are analyzed, a classification is proposed, and types of feedstock that can be effectively used for biomethane production are characterized. Considerable attention is given to the right of biomethane producers to access gas transmission and distribution systems, gas storage facilities, and LNG installations. The main advantages of biomethane production and use as a renewable energy source are outlined. Economic, environmental, and strategic opportunities arising from the development of this type of fuel are highlighted, including reducing energy dependence, stimulating exports, and decarbonizing the energy sector.

Keywords: *renewable energy sources, biogas, biogas upgrading, biomethane, physicochemical parameters, gas chromatography, energy indicators.*

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Коваль М.Г.<https://orcid.org/0000-0001-9680-8052>

Черкаський державний технологічний університет

Ящук Л.Б.<https://orcid.org/0000-0001-8975-851X>

Черкаський державний технологічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЇ ВИТРАТ ПРЯМИХ БАРВНИКІВ ПРИ РЕЦИКЛІНГУ КОНЦЕНТРОВАНОЇ СТИЧНОЇ ВОДИ В ПРОЦЕСІ ФАРБУВАННЯ БАВОВНЯНИХ ТКАНИН

Текстильна промисловість є одним із забруднювачів води. Серед основних забруднювачів виділяють синтетичні барвники, що використовуються в технології фарбування тканин. Актуальним та важливим є створення та впровадження ефективних технологій щодо повторного використання стічних вод, які можуть бути якісною вторинною сировиною, й зменшення споживання дороговартісних барвників, що приведе до екологічності та економічності підприємств, зменшуючи одночасно екологічне навантаження на навколишнє середовище. У статті розглянуто дослідження економії витрат прямих барвників (Прямого червоного світлостійкого, Прямого синього Direct B2RL, Прямого жовтого світлостійкого K) в технології фарбування бавовняних тканин Бязь (арт. 3461) та Віскоза (арт. 3324) з повторним використанням стічної води. Визначено, що концентрована стічна вода, одержана безпосередньо після процесу фарбування тканини з обладнання періодичної дії внаслідок залпових скидів, містить в середньому у своєму складі до 40 % прямих барвників, може бути якісним вторинним ресурсом та повторно використана (рециклінг) в технології фарбування бавовняних тканин. Математичний розрахунок витрат прямих барвників в технології фарбування тканини з використанням стічної води здійснювався з врахуванням та порівнянням вартості двох проходів (циклів) фарбування (першого – власне фарбування тканини з утворенням концентрованої стічної води та другого – фарбування із використанням концентрованої стічної води) на об'єм фарбувальної ванни 800 дм³ (за технологічними умовами діючого фарбувального виробництва ПРАТ «Черкаський шовковий комбінат», м. Черкаси, Україна) на 1200 п.м. бавовняних тканин. Обраховано, що економія витрат барвника Прямого червоного світлостійкого при фарбуванні 1200 п.м. тканини становить для тканини Бязь 26,05%, для тканини Віскоза 33,3%; барвника Прямого синього Direct B2RL для тканини Бязь 25,46%, для тканини Віскоза 15,52%; барвника Прямого жовтого світлостійкого K для тканини Бязь 48,16%, для тканини Віскоза 24,24%.

Ключові слова: фарбувальне виробництво, концентрована стічна вода, прямі барвники, бязь, віскоза, економія витрат.

Постановка проблеми. Швидке зростання індустріалізації та урбанізації в останні десятиліття суттєво збільшило світовий попит на воду, що призвело до серйозного її забруднення. Текстильна промисловість стала головним джерелом забруднення води, їхні стічні води підвищують каламутність води та знижують фотосинтез і рівень розчиненого кисню [1, 2]. Очікується, що попит на прісну воду для фарбувальних операцій у текстильній промисловості ще більше зростатиме, враховуючи щорічний темп зростання ринку моди та одягу на рівні 4 % до 2030 року [3]. Серед різних забруднювачів виділяються синте-

тичні барвники, що використовуються в технологічних процесах фарбування та набивання тканин і становлять серйозну екологічну проблему через їхню хімічно стабільну ароматичну структуру та високу стійкість до біодеградації, що робить їх стійкими у водних середовищах [4-6]. Кількість барвників, що застосовується на об'єм обробки текстилю, значно вища для темних та яскравих кольорів, що значно впливає на загальне їх виробництво та використання [7]. Тож, актуальним є створення технологій фарбування та набивання тканин, які забезпечать підвищення ефективності використання барвників і допоміжних хімікатів,



збільшення продуктивності за рахунок оборотних процесів, економічне зменшення витрат барвників та інших матеріалів, зменшення викидів та екологічного впливу на довкілля.

Фарбування у текстильній промисловості потребує великих обсягів прісної води, що створює труднощі з обробкою та створює стічні води з високим органічним навантаженням, що важко очищати і спричиняє високі витрати на очищення. Кількість споживаної води залежить від процесу фарбування та типів тканин, що випускаються. Загалом близько 200л води використовується для виготовлення 1кг тканини [8]. Встановлено, що в процесах, пов'язаних із фарбуванням тканини, 38% води використовується під час відбілювання, 16% при фарбуванні, 8% для набивання, 14% в котельних для нагріву, 24% для інших технологічних потреб [9].

Текстильна промисловість використовує сотні тисяч синтетичних барвників для комерційно доступних фарбувальних тканин із оціночною річною виробничою потужністю 7×10^5 тонн [10]. Більшість текстильних барвників, що виробляються і використовуються для фарбування тканин – це азобарвники, які становлять понад 70% ($\square 9$ мільйонів тонн) від загального виробництва всіх барвників [11]. Це викликає необхідність у створенні нових технологій, які б забезпечували економію водних ресурсів, дороговартісних текстильних барвників та зменшували б екологічне навантаження на навколишнє середовище.

Надзвичайно важливим у конкурентній текстильній промисловості є оптимізація операційної ефективності та ресурсозбереження. Важливим компонентом витрат у текстильному виробництві, особливо у фарбуванні, є споживання води та барвників. Тому, актуальним та критично важливим як для економічної життєздатності текстильних підприємств, так і для екологічності їхніх виробництв є створення та впровадження ефективних технологій щодо зменшення споживання дороговартісних барвників, зокрема в технології фарбування тканин. Зменшення кількості використання барвників не лише зменшить економічні показники собівартості пофарбованої тканини, а й мінімізує хімічне навантаження на утворені стічні води, зменшивши екологічний вплив на водну екосистему.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Над проблемою мінімізації витрат барвників та води, використанням стічної води, як оборотного ресурсу, в технології фарбування тканини працювали вчені багатьох країн. У роботі [12] науковці

Хоке Р.У., Джаліл М.А., Хоссайн С., Хан А.Н. (Hoque R.U., Jalil M.A., Hossain S., Khan A.N.) запропонували модифікацію процесу, яка переробляє воду, використану для нейтралізації та промивання, на другому етапі фарбування. Ця перероблена вода використовується на четвертому етапі, ефективно зменшуючи загальне споживання води до 104 літрів на кілограм тканини, таким чином економивши 16 літрів на кілограм без додаткових інвестицій. Впровадження цього екологічно чистого підходу може не лише суттєво зменшити споживання води та генерацію стічних вод, а й мінімізувати виробничі витрати, зменшити потребу в дорогих об'єктах очищення води та управління стічних вод.

У статті [13] «Відновлення та повторне використання фарбувальних ванн для текстилю» (Textile Dyebath Reconstitution and Reuse) обговорюється створення технології відновлення та повторного використання відпрацьованих розчинів фарбувальних ванн у текстильній промисловості. Ця технологія була продемонстрована у виробничих умовах на великій килимовій фабриці на південному сході США під час фарбування синтетичних килимів. Впроваджена технологія дозволила вирішити ряд проблем: зміну рецептури барвників однієї групи для фарбування багатьох відтінків; повторне використання фарбувальних ванн в рамках звичайного виробничого графіка; виробництво високоякісної продукції з використанням перероблених фарбувальних ванн; адаптація технології повторного використання фарбувальних ванн до стандартної технології фарбування на фабриці. Результатом впровадженої технології є скорочення викидів забруднюючих речовин та зменшення використання води на 25-50%. Повторне використання фарбувальних ванн, за прогнозами, могло б заощадити 180000 доларів США на рік, якби половина ванн на комбінаті була переобладнана для повторного використання.

Дослідники з Бразилії Чіарелло Л.М., Міттерштайнер М., Сесар де Жезус П., Андреаус Дж., Барселлос І. (Chiarello L.M., Mittersteiner M., Cesar de Jesus P., Andreaus J., Barcellos I.) [14] експериментальним шляхом визначали кількість циклів повторного використання залишкових фарбувальних ванн від реактивного фарбування бавовни, попередньо ферментативно оброблених пероксидазою хрону. Така обробка привела до видалення кольору стічних вод на 99%, що дозволило їх подальше повторне використання з економією близько 200-600л води на партію фарбування 200кг бавовняної тканини.

З метою мінімізації витрат тепла та енергії на процес фарбування бавовняної тканини прямими барвниками, дослідники з Індії у роботі «Процес мінімізації витрат тепла та енергії для прямого фарбування бавовняної тканини триетаноламіном» (A cost minimization process of heat and energy consumption for direct dyeing of cotton fabric coloration with triethanolamine) [15] запропонували замість натрій карбонату використовувати триетаноламін у рецептурі фарбувальної ванни з низькою (30°C), середньою (60°C) та високою (90°C) температурами фарбування. В результаті дослідження, пофарбовані зразки бавовняної тканини порівнювали із зразками, пофарбованими за звичайною технологією. За результатами, сила кольору (K/S) та кольорова відмінність були прийнятними в порівнянні з традиційним процесом фарбування при високій температурі з натрій карбонатом. Вартість низькотемпературного фарбування була зведена до мінімуму 2,24 рупій порівняно з вартістю фарбування з натрій карбонатом при високій температурі.

Іспанські вчені Бусіо В., Гарсія-Хіменес М., Віласека М., Лопес-Грімая В., Креспі М., Гутьєрес-Бузан С. (Buscio V., García-Jiménez M., Vilaseca M., López-Grimau V., Crespi M., Gutiérrez-Bouzán C.) [16] пропонують повторно використовувати стічну воду фарбувального виробництва, попередньо очищуючи її за допомогою нанофільтраційних мембран Hydracore10 і Hydracore50. Знебарвлені та очищені стоки були повторно використані в нових процесах фарбування. Пофарбовані тканини оцінювалися з точки зору оригінального фарбування. Було визначено, що відмінності в кольорі знаходяться в діапазоні сприйняття.

У роботі [3] «Переробка стічних вод від фарбування текстилю за допомогою озонування: екологічно сталий підхід до зменшення споживання прісної води та хімікатів, а також зниження експлуатаційних витрат» (Recycling textile dyeing effluent through ozonation: An environmentally sustainable approach for reducing freshwater and chemical consumption and lowering operational costs) науковці з Індії займалися переробкою стічних вод фарбувального виробництва шляхом її озонування. В ході дослідження було виявлено значну економію при фарбуванні реактивними (активними) барвниками обробленими стічними водами, зокрема, на 60 % зниження споживання прісної води та 75% у споживанні солі, як додаткового реагента, порівняно з традиційним фарбуванням прісноводною водою.

Науковці з Китаю Лу С., Лю Л., Лю Р., Чень Ц. (Lu X., Liu L., Liu R., Chen J.) [17] досліджували

пілотну станцію з біологічними очисними системами та мембранною технологією рекультивації стічних вод. Результати показали, що середня ефективність видалення кольору, мутності становила відповідно близько 94,5% і 92,9%. Загальна вартість рекультивації стічних вод становила приблизно 0,25 долара США/м³ з урахуванням початкових виробничих витрат. Якість очищених стічних вод задовольняла вимогу якості води для фарбування та обробки, за винятком світлого забарвлення.

У роботі [18] «Водозберігаючий процес фарбування: сталий підхід до фарбування бавовняної тканини у вихлопних газах» (Water-Saving Dyeing Process: A Sustainable Approach for Exhaust Dyeing of Cotton Fabric) описано впровадження інноваційного процесу економії води для фарбування бавовняних тканин реактивними барвниками. Традиційні методи фарбування текстилю споживають приблизно 120 літрів прісної води на кілограм бавовняної тканини, що сприяє деградації навколишнього середовища. Вченими запропоновано модифікацію процесу, під час якого переробляють воду, використану для нейтралізації та промивання, на другому етапі фарбування, ефективно зменшуючи загальне споживання води до 104 літрів на кілограм тканини. Впровадження цього екологічно чистого підходу може не лише суттєво зменшити споживання води та генерацію стічних вод, а й зменшити потребу в дорогих об'єктах очищення води та управління стічними водами.

Постановка завдання. Метою досліджень є математичне обрахування економії витрат прямих барвників шляхом порівняння вартості рецептур фарбування бавовняних тканин за базовою технологією реального фарбувального виробництва та новою технологією з використанням концентрованої стічної води.

Виклад основного матеріалу. Відомо [19], що традиційні технології фарбування текстильних матеріалів пов'язані як зі споживанням матеріальних та енергетичних ресурсів, так і з утворенням відходів у вигляді стічних вод. Ці технології мають основний недолік – утилізації підлягають значні обсяги стічної води, що містять у своєму складі органічні та токсичні хімічні речовини, що входять до складу фіксаторів, мийних засобів, барвників і солей, і тому є найбільш забруднюючими серед усіх промислових відходів [20-22].

Концентрована стічна вода, одержана безпосередньо після процесу фарбування тканини з обладнання періодичної дії внаслідок залпових скидів, може бути якісною вторинною сировиною

та повторно бути використаною в технології фарбування текстильних матеріалів. Стоки, що виділяються з текстильного процесу фарбування, мають складний характер з високою лужністю, концентрацією електролітів і глибоко забарвлені за рахунок великого вмісту барвника. Практичним шляхом досліджено [23], що середній вміст текстильних барвників у концентрованій стічній воді такий: дисперсних барвників – 39%, реактивних барвників – до 45%. При фарбуванні прямими барвниками стічні води містять близько 43% барвника разом зі значною кількістю електроліту та луку.

Дослідження щодо можливості фарбування бавовняних тканин прямими барвниками Прямим червоним світлостійким, Прямим синім Direct B2RL, Прямим жовтим світлостійким К із повторним використанням концентрованих стічних вод, що містять прямі барвники, виконані в реальних виробничих умовах ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат» («ЧШК», м. Черкаси, Україна) та описані в роботах [24, 25]. За новою технологією була створена нова рецептура фарбувальної ванни, яка включала в себе концентровану стічну воду та розраховану кількість барвника. Колірні характеристики пофарбованих зразків тканин, представлені в табл. 1, вказують на можливість повторного використання концентрованої стічної води в технології фарбування прямими барвниками. Допуски прийнятності ПрАТ «ЧШК» для досліджуваних зразків (у порівнянні з виробничими еталонними): відхилення інтенсивності забарвлення до 5%, світлості (DL), відтінків Da (червоно-зеленого) і Db (жовто-синього) до ± 2 .

Для визначення маси залишкового барвника у стічній воді та маси барвника, яку необхідно додати до стічної води для утворення нового технологічного розчину (фарбувальної ванни) використовували закон Бугера-Ламберта-Бера та значення молярної концентрації досліджуваних розчинів барвників. Маса барвника, яка додавалася до концентрованої стічної води, вираховувалася математично і ґрунтувалася на спектрофотометричних дослідженнях технологічних фарбувальних розчинів та одержаних концентрованих стічних вод [24, 25]. Результати математичних розрахунків та вміст прямих барвників у фарбувальній ванні та утвореній концентрованій стічній воді наведені в таблиці 2.

Рецептура для нових фарбувальних розчинів розраховувалася математично. Вона складається із 3% попередньо розвареного розчину барвника (за технологічним режимом ПрАТ «ЧШК») і доданої концентрованої стічної до загального об'єму фарбувальної машини. Склад нових технологічних розчинів наведений в таблиці 3.

Виробнича фарбувально-роликова машина періодичної дії типу «Jigger» (Vald Henriksen, Нідерланди) за один прохід фарбує 1200 погонних метрів (п.м.) тканини.

Розрахунок витрат прямих барвників в технології фарбування тканини з використанням стічної води здійснювався з врахуванням та порівнянням вартості двох проходів (циклів) фарбування (першого – власне фарбування тканини з утворенням концентрованої стічної води та другого – фарбування із використанням концентрованої стічної води). Результати розрахунків наведені в таблицях 4 і 5.

Таблиця 1

Колірні характеристики пофарбованих тканин прямими барвниками з використанням концентрованої стічної води порівняно з базовою технологією ПрАТ «ЧШК», яка є еталонном

Барвник	Тканина	Світлість DL	Відтінок (червоно-зелений) Da	Відтінок (жовто-синій) Db	Кольорова відмінність DE*	Інтенсивність забарвлення, % відповідно до еталону (100%)
Прямий червоний світлостійкий	Бязь (арт. 3461)	-0,1 темніший	+2,22 червоніший	-0,96 синіший	1,4	99
	Віскоза (арт.3324)	+0,37 світліший	+1,07 червоніший	+0,43 жовтіший	1,22	96,3
Прямий синій Direct B2RL	Бязь (арт. 3461)	+0,26 світліший	-0,30 зеленіший	-0,07 синіший	0,41	97,4
	Віскоза (арт.3324)	+0,44 світліший	-0,2 зеленіший	-0,96 синіший	1,2	95,6
Прямий жовтий світлостійкий К	Бязь (арт. 3461)	+0,43 світліший	+0,85 червоніший	+1,1 жовтіший	1,78	95,7
	Віскоза (арт.3324)	+0,48 світліший	+1,62 червоніший	+1,47 жовтіший	1,89	95,2

* Кольорова відмінність – математичне уявлення, що дає змогу чисельно виразити відмінність між двома кольорами в колориметрії. DE не має перевищувати 2, що приблизно відповідає мінімально помітній для людського ока відмінності між кольорами [26, С. 29-32].

Загальна вартість фарбувальної ванни для фарбування за базовою технологією ПрАТ «ЧШК» становить:

$$\Sigma B = BB_n + B_c + B_{cod} + B_e \quad (1)$$

де ΣB – загальна вартість фарбувальної ванни за базовою технологією ПрАТ «ЧШК», грн

BB_n – вартість прямого барвника, грн

B_c – вартість кухонної солі, грн;

B_{cod} – вартість кальцинованої соди, грн

B_e – вартість водопровідної води, грн

За формулою (1) загальна вартість фарбувальної ванни для фарбування барвником Прямим червоним світлостійким за базовою технологією ПрАТ «ЧШК» становить:

$$\Sigma B_{nc} = 2189 \text{ грн} + 300 \text{ грн} + 48 \text{ грн} + 42,5 \text{ грн} = 2580,2 \text{ грн}$$

Вартість барвника прямого червоного світлостійкого, який потрібно додати у стічну воду за новою технологією становить:

$$BB_{nm} = mB_{nc} \cdot BB_{nc}, \quad (2)$$

де BB_{nm} – вартість барвника, яку потрібно додати у фарбувальну ванну за новою технологією, грн;

mB_{nc} – маса барвника Прямого червоного, яку потрібно додати до стічної води за новою технологією, кг;

BB_{nc} – вартість 1 кг барвника Прямого червоного світлостійкого, грн.

За рівнянням (2) обраховуємо:

$$BB_{nm} = 4,56 \text{ кг} \cdot 270 \text{ грн} = 1231,2 \text{ грн} \quad (3)$$

Вартість двох проходів фарбування барвником Прямим червоним світлостійким:

$$\Sigma \Phi = BB_{nm} + BB_{nm} = 1231,2 \text{ грн} + 2580,2 \text{ грн} = 3811,4 \text{ грн} \quad (4),$$

де $\Sigma \Phi$ – вартість двох проходів фарбування барвником Прямим червоним світлостійким, грн

BB_{nm} – вартість барвника, який потрібно додати за новою технологією із використанням стічної води, грн;

Таблиця 2

Вміст прямих барвників у технологічних фарбувальних розчинах та в одержаній стічній воді (на об'єм розчину фарбувальної ванни 800 дм³)

Барвник	Тканина	Концентрація барвника в технологічному фарбувальному розчині, (моль/дм ³)	Концентрація барвника в стічній воді, (моль/дм ³)	Масова концентрація барвника у стічній воді, %	Маса барвника у стічній воді, кг
Прямий червоний світлостійкий	Бязь (арт. 3461)	9,23	4,05	43,83	3,55
	Віскоза (арт.3324)	9,23	5,60	60,67	4,83
Прямий синій Direct B2RL	Бязь (арт. 3461)	7,97	3,67	46	3,73
	Віскоза (арт.3324)	7,97	1,08	13,6	1,1
Прямий жовтий світлостійкий К	Бязь (арт. 3461)	8,64	0,334	4	0,32
	Віскоза (арт.3324)	8,64	2,57	29,67	2,36

Таблиця 3

Рецептура створеного фарбувального технологічного розчину з використанням концентрованої стічної води (на об'єм розчину фарбувальної ванни 800 дм³)

Барвник	Тканина	Маса барвника, яку потрібно додати до стічної води, кг	Об'єм розчину барвника (3%), який необхідно додати до стічної води, дм ³	Об'єм концентрованої стічної води, дм ³ (для об'єму фарбувального розчину 800 дм ³)
Прямий червоний світлостійкий	Бязь (арт. 3461)	4,56	67,4	732,6
	Віскоза (арт.3324)	3,14	47,2	752,8
Прямий синій Direct B2RL	Бязь (арт. 3461)	4,38	64,8	735,2
	Віскоза (арт.3324)	6,87	103,7	696,3
Прямий жовтий світлостійкий К	Бязь (арт. 3461)	7,78	116,0	684
	Віскоза (арт.3324)	5,6	84,0	716

$B_{\text{от}}$ – вартість одного проходу фарбування барвником Прямими червоним світлостійким за базовою технологією ПрАТ «ЧШК», грн.

За два проходи фарбування фарбують 2400 п.м. тканини, тому що за 1 прохід фарбують 1200 п.м. тканини. Вартість фарбування 1 п.м. при фарбуванні із стічною водою за новою технологією обраховується із використанням обрахунків (4) і становить:

$$B\Phi_{\text{пм}} = \frac{1_{\text{пм}} \cdot \Sigma \Phi}{2400_{\text{пм}}} = \frac{1 \cdot 3811,4}{2400} = 1,59 \text{ грн} \quad (5)$$

Вартість фарбування 1200 п.м. тканини за один прохід за новою технологією із використанням концентрованої стічної води становить:

$$B_{\phi} = B\Phi_{\text{пм}} \cdot 1200_{\text{пм}} = 1,59 \text{ грн} \cdot 1200_{\text{пм}} = 1908 \text{ грн} \quad (6)$$

Економія витрат прямих барвників для фарбування бавовняних тканин за новою рецептурою із використанням концентрованої стічної води розрахована математично за формулою:

$$E = \Sigma B_{\text{пр}} - B_{\phi} \quad (7)$$

де E – економія витрат використання прямого барвника при фарбуванні бавовняної тканини за

новою рецептурою із концентрованою стічною водою, грн/1200 п.м. тканини;

$\Sigma B_{\text{пр}}$ – вартість витрат прямого барвника за базовою виробничою рецептурою, грн/1200 п.м. тканини;

B_{ϕ} – вартість витрат прямого барвника за новою рецептурою із використанням концентрованої стічної води, грн/1200 п.м. тканини.

Для барвника Прямого червоного світлостійкого економія витрат становить:

$$E = 2580,2 \text{ грн} - 1908 \text{ грн} = 672,2 \text{ грн}, \quad \text{що становить } 26,05\% \quad (8)$$

Аналогічно здійснено математичні розрахунки економії витрат барвників Прямого синього Direct B2RL та Прямого жовтого світлостійкого К.

Результати розрахунку вартості фарбування прямими барвниками за базовою та новою технологіями (із використанням концентрованої стічної води) на об'єм фарбувальної ванни 800 дм³ (за умовами ПрАТ «ЧШК») для бавовняної тканини Бязь (арт. 3461) масою 270,17 кг на 1200 п.м. представлена в таблиці 4.

Результати розрахунку вартості фарбування прямими барвниками за базовою та новою техно-

Таблиця 4

Результати розрахунку вартості використання прямих барвників під час фарбування тканини Бязь (арт. 3461)

Компонент за рецептурою фарбування	Кількість компоненту, кг (дм ³)		Вартість компоненту*, грн		
	за базовою рецептурою	за новою рецептурою (із використанням стічної води)	за 1 кг (м ³) (разом із ПДВ)	за базовою технологією	за новою технологією
Прямий червоний світлостійкий					
Барвник	8,11	4,56 (67,4 розв 3%)	270	2189,7	1231,2
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2	-	40	48	-
Кухонна сіль NaCl	12	-	25	300	-
Вода водопровідна	778,69	-	54,58	42,5	-
Концентрована стічна вода	-	732,6	-	-	676,8
Всього:	800	800	389,58	2580,2	1908
Прямий синій Direct B2RL					
Барвник	8,11	3,73 (64,8 розв 3%)	480	3892,80	2102,4
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2	-	40	48	-
Кухонна сіль NaCl	12	-	25	300	-
Вода водопровідна	778,69	-	54,58	42,5	-
Концентрована стічна вода	-	735,2	-	-	1090,43
Всього:	800	800	599,58	4283,3	3192,83
Прямий жовтий світлостійкий К					
Барвник	8,11	0,32 (116 розв 3%)	400	3244	128
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2	-	40	48	-
Кухонна сіль NaCl	12	-	25	300	-
Вода водопровідна	778,69	-	54,58	42,5	-
Концентрована стічна вода	-	684	-	-	1756
Всього:	800	800	519,58	3634,5	1884

* – ціни вказані станом на 1.09.2025 р.

логіями на об'єм фарбувальної ванни 800дм³ (за умовами ПрАТ «ЧШК») для бавовняної тканини Віскоза (арт. 3324) масою 265,62кг на 1200 п.м. представлена в таблиці 5.

Загальні результати економії витрат прямих барвників за базовою та новою технологіями із

використанням концентрованої стічної води представлені на рис. 1. і 2.

Середнє значення економії витрат прямих барвників за новою технологією із використанням концентрованої стічної води для тканини Бязь (арт. 3461) становить 33,2%; для тканини

Таблиця 5

**Результати розрахунку вартості використання прямих барвників
під час фарбування тканини Віскоза (арт. 3324)**

Компонент за рецептурою фарбування	Кількість компоненту, кг (дм ³)		Вартість компоненту*, грн		
	за базовою рецептурою	за новою рецептурою (із використанням стічної води)	за 1 кг (м ³) (разом із ПДВ)	за базовою технологією	за новою технологією
Прямий червоний світлостійкий					
Барвник	7,97	3,14 (47,2 розв 3%)	270	2151,9	847,8
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2		40	48	-
Кухонна сіль NaCl	12		25	300	-
Вода водопровідна	778,83		54,58	42,5	-
Концентрована стічна вода	-	752,8	-	-	847,2
Всього:	800	800	389,58	2542,4	1695
Прямий синій Direct B2RL					
Барвник	7,97	6,87 (103,7 розв 3%)	480	3825,6	3297,6
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2	-	40	48	
Кухонна сіль NaCl	12	-	25	300	
Вода водопровідна	778,83	-	54,58	42,5	
Концентрована стічна вода	-	696,3	-	-	264
Всього:	800	800	599,58	4216,1	3561,6
Прямий жовтий світлостійкий К					
Барвник	7,97	5,6 (84 розв 3%)	400	3188	2240
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2	-	40	48	-
Кухонна сіль NaCl	12	-	25	300	-
Вода водопровідна	778,83	-	54,58	42,5	-
Концентрована стічна вода		716	-	-	472
Всього:		800	519,58	3578,5-	2712

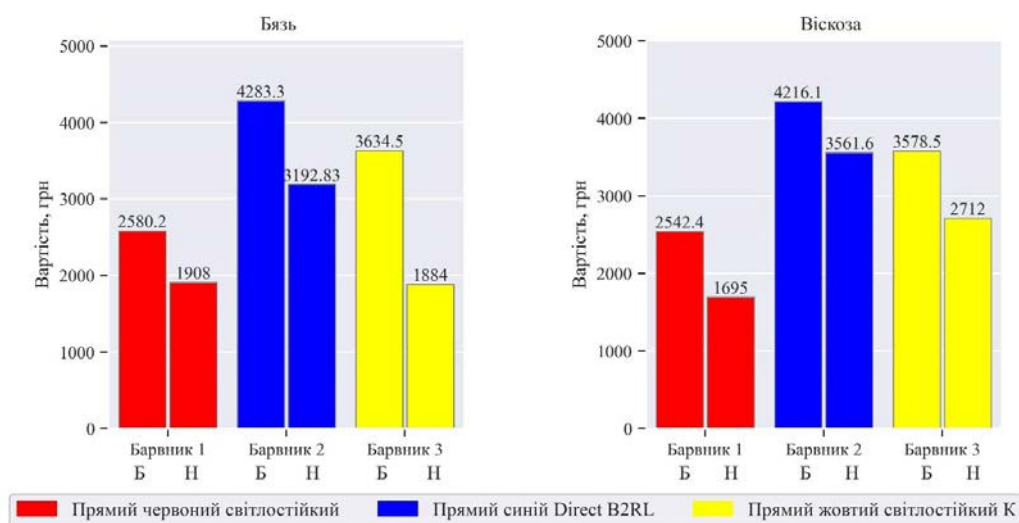


Рис. 1. Вартість фарбувальної ванни з використанням прямих барвників на кожні 1200 п.м. бавовняних тканин Вязь та Віскоза: Б – за базовою технологією ПрАТ «ЧШК»; Н – за новою технологією із використанням концентрованої стічної води

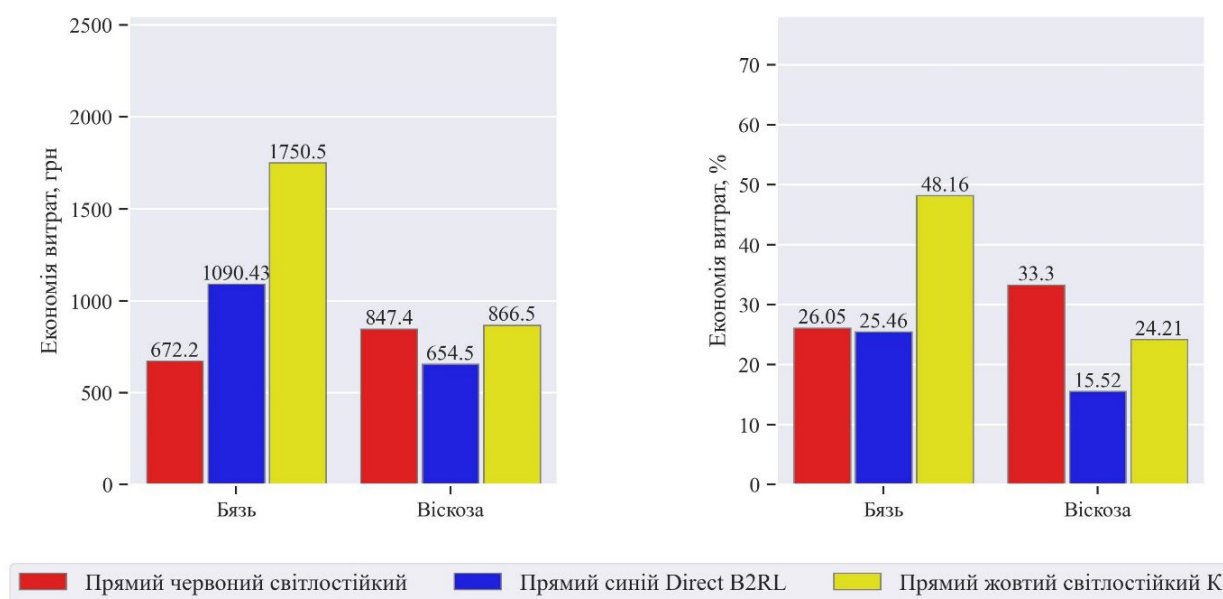


Рис. 2. Економія витрат (в грн та %) прямих барвників в технології фарбування з використанням концентрованої стічної води на кожні 1200 п.м. бавовняної тканини

Віскоза (арт. 3324) – 24,3% на кожні 1200 п.м. тканини.

Висновки. Шляхом експериментальних та математичних обрахунків визначено, що концентрована стічна вода, одержана безпосередньо після процесу фарбування тканини з обладнання періодичної дії внаслідок залпових скидів, містить в середньому у своєму складі до 40 % прямих барвників і може бути якісним вторинним ресурсом та повторно використана (рециклінг) в технології фарбування бавовняних тканин. Створена рецептура нових технологічних розчинів фарбувальних ванн, яка складалася із 3% попередньо розвареного розчину прямого барвника (за технологічним режимом ПрАТ «ЧШК») і доданої концентрованої

стічної води, забезпечувала стійкість забарвлення пофарбованих бавовняних тканин на рівні еталонних. Математично обраховано, що економія витрат барвника Прямого червоного світлостійкого при фарбуванні 1200 п.м. тканини становить для тканини Бязь 26,05%, для тканини Віскоза 33,3%; барвника Прямого синього Direct B2RL для тканини Бязь 25,46%, для тканини Віскоза 15,52%; барвника Прямого жовтого світлостійкого К для тканини Бязь 48,16%, для тканини Віскоза 24,24%. Середнє значення економії витрат прямих барвників за новою технологією із використанням концентрованої стічної води для тканини Бязь (арт. 3461) становить 33,2%; для тканини Віскоза (арт. 3324) – 24,3% на кожні 1200 п.м. тканини.

Список літератури:

1. Tanaya K., Kumari A., Singh A.K. *et al.* Bioremediation: An Economical Approach for Treatment of Textile Dye Effluents. *Water Air Soil Pollut.* 2024. Vol. 235. № 516. P. 342-361. DOI: 10.1007/s11270-024-07287-y.
2. Kaushik C.P., Ravinder T.N., Kaushik J.K., Gaurav S. Minimization of organic chemical load in direct dyes effluent using low cost adsorbents. *Chemical Engineering Journal.* 2009. Vol. 155, № 1–2. P. 234-240. DOI: 10.1016/j.cej.2009.07.042.
3. Deogaonkar-Baride S., Koli M., Ghuge S.P. Recycling textile dyeing effluent through ozonation: An environmentally sustainable approach for reducing freshwater and chemical consumption and lowering operational costs. *Journal of Cleaner Production.* 2025. Vol. 510, P. 145-164. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145641.
4. Kumari S., Singh R., Jahangeer J. *et al.* Innovative Strategies for Dye Removal from Textile Wastewater: A Comprehensive Review of Treatment Approaches and Challenges. *Water Air Soil Pollut.* 2024. Vol. 235, № 720. P. 267-285. DOI: 10.1007/s11270-024-07532-4.
5. Alsuhaybani M., Alshehri S., Alquwaizany A. *et al.* Effective adsorption of methylene blue using natural Saudi zeolite as a low-cost sustainable adsorbent. *Scientific Reports.* 2026. Vol. 16, № 211. P. 289-311. DOI: 10.1038/s41598-025-33491-9.
6. Aragaw T.A. A review of dye biodegradation in textile wastewater, challenges due to wastewater characteristics, and the potential of alkaliphiles. *Journal of Hazardous Materials Advances.* 2024. Vol. 16, P. 134-168. DOI: 10.1016/j.hazadv.2024.100493.

7. Chemical Economics Handbook. Dyes. 2024. https://www.spglobal.com/content/dam/spglobal/ci/en/documents/products/pdf/CI_0325_Global_CEH_Dyes_Abstract_TOC.pdf (дата звернення 10.03.2026).
8. Ghaly A.E., Ananthashankar R., Alhattab M., Ramakrishnan V.V. Production, Characterization and Treatment of Textile Effluents: A Critical Review. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*. 2014. Vol. 5, №1. P. 1-18. DOI: 10.4172/2157-7048.1000182.
9. Ntuli F., Omoregbe I., Kuipa P., Muzenda E., Belaid M. Characterization of effluent from textile wet finishing operations. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2009*. (San Francisco, USA, 20-22 October). San Francisco, 2009. Vol I, P. 12-18.
10. Aragaw T.A. A review of dye biodegradation in textile wastewater, challenges due to wastewater characteristics, and the potential of alkaliphiles. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2024. Vol. 16, P. 34-48. DOI: 10.1016/j.hazadv.2024.100493.
11. Rawat D., Mishra V., Sharma R.S. Detoxification of azo dyes in the context of environmental processes. *Chemosphere*. 2016. Vol. 155, P. 591-605. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.04.068.
12. Hoque R.U., Jalil M.A., Hossain S., Khan A.N. Water-Saving Dyeing Process: A Sustainable Approach for Exhaust Dyeing of Cotton Fabric. *Research Square*. 2023. P. 1-12. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3606656/v1.
13. Bergenthal J, Hendriks R., Tincher W., Eapen J., Tawa A. Textile Dyebath Reconstitution and Reuse. 1984. P. 840-856. <https://p2infohouse.org/ref/31/30328.pdf>.
14. Chiarello L.M., Mittersteiner M., Cesar de Jesus P., Andreus J., Barcellos I.O. Reuse of enzymatically treated reactive dyeing baths: Evaluation of the number of reuse cycles. *Journal of Cleaner Production*. 2020. P. 267-284. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122033.
15. Hossain A., AK, S. A cost minimization process of heat and energy consumption for direct dyeing of cotton fabric coloration with triethanolamine. *Textile Engineering & Fashion Technology*. 2019. Vol. 5, № 5. P. 235-240. DOI: 10.15406/jteft.2019.05.00207.
16. Buscio V., García-Jiménez M., Vilaseca M., López-Grimau V., Crespi M., Gutiérrez-Bouzán C. Reuse of Textile Dyeing Effluents Treated with Coupled Nanofiltration and Electrochemical Processes. *Academic Open Access Publishing*. 2016. Vol. 9, № 6. P. 490-512. DOI: 10.3390/ma9060490.
17. Lu X., Liu L., Liu R., Chen J. Textile wastewater reuse as an alternative water source for dyeing and finishing processes: A case study. *Desalination*. 2010. Vol. 258, № 1-3. P. 229-232. DOI: 10.1016/j.desal.2010.04.002.
18. Reza-Ul-Hoque Md., Jalil M.A., Hossain S., Khan A.N. Water-Saving Dyeing Process: A Sustainable Approach for Exhaust Dyeing of Cotton Fabric. *Research Square*. 2023. P. 1-12, DOI: 10.21203/rs.3.rs-3606656/v1. <https://www.researchsquare.com/article/rs-3606656/v1>.
19. Романенко Н.Г. Екологічна оптимізація процесів фарбування. *Вісник Херсонського державного технічного університету*. 1998. №3 (3), С. 337-339.
20. Yaseen D.A., Scholz M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019. Volume 16, P. 1193-1226. DOI: 10.1007/s13762-018-2130-z.
21. Bijoy M. Dyeing of Cotton With Direct Dye. 2021. <https://www.textilepad.com/2021/08/dyeing-of-cotton-with-direct-dye.html> (дата звернення 11.03.2026).
22. Maheshwari K., Agrawal M. Gupta A.B. Dye Pollution in Water and Wastewater. *Novel Materials for Dye-containing Wastewater Treatment*. 2021. P. 1–25. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-2892-4_1. (дата звернення 11.03.2026).
23. Коваль М.Г. Планування та організація експериментальних досліджень циклічного використання ресурсів у технології фарбування текстильних матеріалів (на прикладі дисперсного темно-синього барвника Z). *Наукові записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. № 6, Т. 33 (72), С. 203-209. DOI: 10.32782/2663-5941/2022.6/32.
24. Koval M.G., Kosogina I.V. Results of experimental studies on the reuse of concentrated wastewater in the process of dyeing cotton fabrics with direct dyes. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2023. № 31(4). С. 805-815 DOI: 10.15421/jchemtech.v31i4.285962.
25. Koval M.G. Development of dyeing technology and creation of a basic technological scheme for the process of reusing concentrated wastewater (on the example, reducing the consumption of direct Yellow lightfast dye K). *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024. № 32(4). P. 1119-1128. DOI: 10.15421/jchemtech.v32i4.309831.
26. Gaurav S., Raja B. Digital Color Imaging Handbook. 2003. https://books.google.com.ua/books?id=OxIBqY67rl0C&pg=PA31&vq=1.42&dq=jnd+gaurav+sharma&source=gbsearch_s&sig=vresXilemghh1Jq57hr2R6cVXI&redir_esc=y#v=onepage&q=1.42&f=false ISBN 084930900X. (дата звернення 12.03.2026).

Koval M.G., Yashchuk L.B. A STUDY OF COST SAVINGS FROM DIRECT DYES IN THE RECYCLING OF CONCENTRATED WASTEWATER DURING THE DYEING OF COTTON FABRICS

The textile industry is one of the major sources of water pollution. Among the primary pollutants are synthetic dyes used in fabric dyeing processes. It is both timely and important to develop and implement effective technologies for the reuse of wastewater, which can serve as high-quality secondary raw materials, and to reduce the consumption of expensive dyes. This will enhance the environmental sustainability and cost-effectiveness of enterprises while simultaneously reducing the environmental impact on the surrounding ecosystem. This article examines a study on the reduction of direct dye consumption (Direct Red Lightfast, Direct Blue B2RL, Direct Yellow Lightfast K) in the dyeing of cotton fabrics such as Calico (item 3461) and viscose (item 3324) using wastewater reuse. It was determined that concentrated wastewater obtained immediately after the fabric dyeing process from batch-type equipment due to batch discharges contains, on average, up to 40% of direct dyes in its composition, can serve as a high-quality secondary resource, and can be reused (recycled) in the dyeing technology of cotton fabrics.

The mathematical calculation of direct dye consumption in the fabric dyeing process using wastewater was performed by taking into account and comparing the costs of two dyeing passes (cycles)—the first being the actual dyeing of the fabric, which produces concentrated wastewater, and the second being dyeing using concentrated wastewater – for a dye bath volume of 800 dm³ (according to the technological conditions of the existing dyeing production at PJSC “Cherkasy Silk Mill,” Cherkasy, Ukraine) for 1,200 running meters of cotton fabrics. It was calculated that the savings in Direct Red Lightfast dye consumption when dyeing 1,200 running meters of fabric amount to 26.05% for calico fabric and 33.3% for viscose fabric; Direct Blue B2RL dye for calico fabric is 25.46%, for viscose fabric 15.52%; Direct Yellow Lightfast K dye for calico fabric is 48.16%, for viscose fabric 24.24%.

Keywords: dyeing industry, concentrated wastewater, direct dyes, calico, viscose, cost savings.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Нестеренко М.Б.<https://orcid.org/0009-0007-9974-6150>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ (ВАПНЯКУ ТА ПІСКУ) НА ФОРМУВАННЯ ПОРОВОЇ СТРУКТУРИ ТА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ

Інтенсивний розвиток будівельної галузі зумовлює необхідність підвищення довговічності й експлуатаційної надійності сухих будівельних сумішей, що застосовуються в мурувальних, штукатурних і ремонтних технологіях. Одним із ключових чинників, що визначає стійкість таких матеріалів до кліматичних впливів, є особливості формування їх порової структури. Мікроструктура цементного каменю безпосередньо впливає на водопоглинання, проникність та стійкість до циклів заморожування і відтавання. У цьому контексті важливого значення набуває дослідження ролі мінеральних наповнювачів природного походження, зокрема піску та вапняку, в процесах структуроутворення цементних композицій. Метою дослідження є встановлення впливу фізико-хімічних і гранулометричних характеристик мінеральних наповнювачів на формування порової структури та морозостійкість сухих будівельних сумішей у складі модифікованих в'язучих систем. Методологічною основою дослідження є узагальнення сучасних наукових підходів до аналізу структури цементних композицій, порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень та систематизація наукових даних щодо впливу гранулометричних і мінералогічних характеристик наповнювачів на структуру цементного каменю. У результаті проведеного дослідження узагальнено закономірності впливу дисперсності та мінералогічного складу піску і вапняку на формування мікроструктури цементних композицій. Показано, що використання дрібнодисперсного вапнякового порошку сприяє ущільненню структури цементного каменю та зменшенню об'єму капілярних пор. Доведено, що поєднання полідисперсних фракцій кварцового піску забезпечує більш ефективне пакування зерен і формування рівномірної мікропористої структури. Установлено взаємозв'язок між параметрами пористості та морозостійкістю цементних композицій, адже зменшення кількості відкритих капілярних пор і формування системи мікропор сприяє підвищенню стійкості матеріалу до циклічних температурних впливів. На основі узагальнення отриманих результатів сформовано рекомендації щодо оптимізації складу сухих будівельних сумішей шляхом раціонального підбору мінеральних наповнювачів різної дисперсності. Перспективи подальших досліджень пов'язані з експериментальним вивченням мікроструктурних процесів у модифікованих в'язучих системах із використанням різних фракцій природних і техногенних мінеральних наповнювачів, а також із розробленням композицій будівельних матеріалів для експлуатації в умовах різких кліматичних коливань.

Ключові слова: мінеральні наповнювачі, цементні композиції, мікроструктура цементного каменю, гранулометричний склад, довговічність будівельних матеріалів, модифіковані в'язучі системи.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток будівельної галузі пов'язаний із широким застосуванням сухих будівельних сумішей, що використовуються для мурувальних, штукатурних і ремонтних робіт. Експлуатаційна надійність таких матеріалів значною мірою визначається їх мікроструктурою, зокрема параметрами порового простору, який формується в процесі тверднення в'язучих систем. Пористість безпосередньо впливає на водопоглинання, міцність

і стійкість матеріалу до циклічного заморожування-відтавання. Дослідження показують, що зміна гранулометричного складу та мінералогічної природи наповнювачів здатна істотно модифікувати структуру пор і, відповідно, довговічність цементних композицій [1; 2]. У зв'язку з цим підбір і модифікація мінеральних наповнювачів є одним із ключових напрямів підвищення експлуатаційних характеристик сухих будівельних сумішей.

Особливу увагу дослідників привертає використання природних мінеральних матеріалів (піску та вапняку) як функціональних компонентів цементних систем. Їхня мінералогічна структура, форма частинок і поверхнева активність можуть впливати не лише на ущільнення структури розчину, але і на процеси гідратації в'язучих речовин. За результатами сучасних експериментальних досліджень встановлено, що застосування вапнякового порошку або модифікованого піску може сприяти формуванню більш рівномірної порової структури та підвищенню морозостійкості цементних матеріалів [3; 4]. Водночас у науковій літературі відзначається, що вплив таких наповнювачів залежить від їхніх фізико-хімічних характеристик, дисперсності та взаємодії із компонентами в'язучої системи.

Незважаючи на значну кількість наукових праць у галузі композиційних будівельних матеріалів, питання формування порової структури сухих будівельних сумішей за участю різних мінеральних наповнювачів залишається недостатньо вивченим. Деякі роботи демонструють позитивний ефект використання альтернативних мінеральних порошоків або техногенних матеріалів, які здатні змінювати структуру цементного каменю та підвищувати його стійкість до впливу низьких температур. Водночас механізми впливу традиційних природних компонентів, таких як кварцовий пісок і вапняковий порошок, на мікроструктуру та морозостійкість сухих сумішей потребують подальшого системного аналізу.

Для української будівельної практики ця проблема має особливу актуальність, оскільки значна частина конструкцій експлуатується в умовах циклічних температурних коливань і підвищеної вологості. Рациональне використання мінеральних наповнювачів дозволяє як покращити структуру цементного каменю, так і знизити матеріалоемність та підвищити довговічність будівельних матеріалів [5, с. 137–139; 6]. Отже, дослідження впливу характеристик піску та вапняку на формування порової структури і морозостійкість сухих будівельних сумішей є важливим науковим і практичним завданням у сфері хімічної технології композиційних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика формування порової структури цементних композицій та її впливу на морозостійкість будівельних матеріалів активно досліджується у світовій науковій літературі. Значна частина робіт присвячена вивченню ролі мінеральних наповнювачів у структуроутворенні цементного

каменю. Так, Х. Цзенг (H. Zeng) та Ю. Лі (Y. Li) встановили, що вапнякові та гранітні порошки у складі цементних композицій може зменшувати загальну пористість і підвищувати міцність матеріалу в умовах низьких температур. Науковці пояснюють це ефектом ущільнення структури цементного каменю [7]. Водночас М. Чжоу (M. Zhou) та В. Донг (W. Dong) доводять, що зміна гранулометрії піску призводить до трансформації порової системи та безпосередньо впливає на міцнісні характеристики бетону в умовах низьких температур [8]. Також Л. Фенг (L. Feng) та ін. дослідили синергетичний ефект гумового порошку та нанокремнезему, довівши, що така комбінація сприяє формуванню більш стабільної порової структури та підвищує морозостійкість бетону [9].

У сучасних міжнародних дослідженнях значна увага приділяється мікроструктурним механізмам деградації цементних матеріалів під час циклічного заморожування. Наприклад, Р. Ванг (R. Wang) та ін. встановили, що використання пустельного піску в сухих мурувальних розчинах змінює структуру капілярних пор, що впливає на характер руйнування матеріалу під час морозних циклів [10]. Подібні результати отримали Ц. Ву (Q. Wu) та ін., які довели, що синтетичний вапняковий пісок може підвищувати морозостійкість цементних систем на основі магній-калій-фосфатного цементу [11].

Питання використання вапнякових агрегатів і наповнювачів у цементних композиціях також розглянуто в роботах К. Сіамарді (K. Siamardi), С. Шабані (S. Shabani) та А. Мансуріана (A. Mansourian), які показали, що оптимізація складу сумішей із вапняковими агрегатами дозволяє покращити структурну однорідність цементного каменю [12]. У свою чергу, Д. Шен (D. Shen) та ін. встановили, що гумові частинки можуть змінювати еволюцію порової структури під час циклів заморожування-відтавання [13].

В українських дослідженнях також приділяється увага формуванню структури цементно-піщаних матеріалів. Зокрема, А. Бондар та ін. також відзначають перспективність використання вторинних мінеральних матеріалів у виробництві сухих будівельних сумішей [14]. Також С. Шарма (S. Sharma) та А. В'яс (A. Vyas) показують, що мінеральні порошки можуть ефективно використовуватися як дрібні агрегати у цементних розчинах [15].

Отже, аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що більшість досліджень зосереджена на бетонних композиціях або на окремих видах

модифікаторів. При цьому недостатньо вивченими залишаються питання взаємодії природних мінеральних наповнювачів, таких як кварцовий пісок і вапняковий порошок, у складі сухих будівельних сумішей та їх впливу на формування порової структури і морозостійкість матеріалів. Саме ця наукова проблема потребує подальшого дослідження, що і визначає актуальність та спрямованість представленої роботи.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження впливу характеристик мінеральних наповнювачів (піску та вапняку) на формування порової структури і морозостійкість сухих будівельних сумішей у складі модифікованих в'язучих систем. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

1. Дослідити вплив гранулометричних і мінералогічних характеристик піску та вапняку на формування порової структури сухих будівельних сумішей.
2. Проаналізувати взаємозв'язок між параметрами пористості цементного каменю та морозостійкістю матеріалу.
3. Сформулювати рекомендації щодо використання піску та вапняку для підвищення морозостійкості сухих будівельних сумішей.

Виклад основного матеріалу. Формування порової структури цементних композицій є складним багатофакторним процесом, який визначається співвідношенням компонентів суміші, гранулометричним складом наповнювачів та умовами гідратації в'язучих речовин. Мінеральні наповнювачі виконують не лише функцію інертного заповнювача, але і здатні істотно впливати на мікроструктуру цементного каменю. Дрібнодисперсні частинки піску та вапнякового порошку беруть участь у формуванні структури капілярних пор і впливають на щільність пакування зерен у композиції.

Зміна дисперсності мінеральних наповнювачів приводить до перерозподілу порового простору. Зокрема, збільшення частки тонкодисперсних фракцій сприяє зменшенню об'єму великих капілярних пор і формуванню більш рівномірної мікропористої структури. Подібні результати також отримані в дослідженнях цементних систем із використанням вапнякового наповнювача, де було встановлено підвищення щільності структури цементного каменю та зниження капілярної пористості матеріалу [3].

У дослідженнях, присвячених цементно-піщаним розчинам, також підтверджено важливу роль гранулометрії мінеральних компонентів.

Зокрема, встановлено, що оптимальне співвідношення крупних і дрібних фракцій наповнювача сприяє більш ефективному ущільненню структури матеріалу та зменшенню кількості відкритих пор [5, с. 138–139]. Аналогічні висновки наведені в статті М. Нестеренка, де доведено, що використання вапнякового порошку в модифікованих в'язучих сумішах сприяє формуванню більш стабільної мікроструктури цементного каменю [6].

Отримані результати дозволили систематизувати основні характеристики мінеральних наповнювачів, що впливають на формування порової структури сухих будівельних сумішей (табл. 1). Варто відзначити, що мінералогічні та гранулометричні характеристики піску і вапняку є визначальними чинниками формування порової структури сухих будівельних сумішей.

Морозостійкість цементних матеріалів безпосередньо пов'язана з параметрами порового простору, оскільки під час заморожування вода, що міститься в капілярах, збільшується в об'ємі та створює внутрішні напруження. Чим більший об'єм відкритих капілярних пор, тим вищий ризик руйнування структури матеріалу під час циклів заморожування-відтавання.

У сучасних дослідженнях встановлено, що оптимізація порової структури дозволяє істотно підвищити довговічність цементних композицій. Зокрема, в дослідженні Р. Ванга (R. Wang) показано, що матеріали з рівномірним розподілом мікропор демонструють значно кращу стійкість до циклічних температурних впливів [10]. Подібні результати отримані в статті Ц. Ву (Q. Wu) та ін., які встановили, що застосування вапнякових компонентів сприяє формуванню більш стабільної структури цементного каменю та підвищує морозостійкість розчинів [11].

У роботах, присвячених структурі бетонів, також доведено, що зменшення розміру капілярних пор сприяє зниженню проникності матеріалу для води. Це, у свою чергу, обмежує об'єм води, який бере участь у процесах заморожування. Крім того, встановлено, що використання мінеральних наповнювачів із високою дисперсністю дозволяє зменшити коефіцієнт водопоглинання та підвищити морозостійкість композицій. У таблиці 2 узагальнено взаємозв'язок між параметрами пористості та морозостійкістю матеріалів. Тому оптимізація порової структури цементного каменю є одним із ключових чинників підвищення морозостійкості сухих будівельних сумішей.

Підвищення морозостійкості сухих будівельних сумішей можливе в результаті оптимізації складу мінеральних наповнювачів. Основною умовою є забезпечення раціонального гранулометричного складу суміші, який дозволяє зменшити об'єм відкритих капілярних пор і сформувати більш стабільну мікроструктуру цементного каменю. Використання вапнякового порошку в складі сухих сумішей дозволяє підвищити щільність структури та покращити контакт між зернами цементу і піску. У результаті відбувається формування більш однорідної структури матеріалу, що позитивно впливає на його довговічність. Подібні результати також підтверджують дослідження, присвячені використанню альтернативних мінеральних компонентів у цементних системах [15].

Крім того, ефективним підходом є використання комбінованих мінеральних наповнювачів із різною дисперсністю. Такий підхід дозволяє забезпечити більш щільне пакування зерен і зменшити пористість матеріалу. Водночас застосування вторинних мінеральних матеріалів також

розглядається як перспективний напрям підвищення ефективності сухих будівельних сумішей. Основні рекомендації щодо використання мінеральних наповнювачів у складі сухих будівельних сумішей викладено в таблиці 3.

Враховуючи вищевикладене, оптимізація характеристик мінеральних наповнювачів є ефективним інструментом керування поровою структурою цементного каменю та підвищення морозостійкості сухих будівельних сумішей.

Висновки. Проблема підвищення довговічності сухих будівельних сумішей, що експлуатуються в умовах змінних температур і вологості, залишається важливим науковим та прикладним завданням сучасної будівельної матеріалознавчої науки. Використання природних мінеральних компонентів, зокрема піску та вапняку, відкриває можливості для керування структурою цементних систем і підвищення експлуатаційних характеристик сухих будівельних сумішей.

Досліджено вплив гранулометричних і мінералогічних характеристик піску та вапнякового

Таблиця 1

**Вплив характеристик мінеральних наповнювачів
на формування порової структури цементних композицій**

Характеристика наповнювача	Прояв у структурі цементного каменю	Результат для порової структури
Дрібнодисперсний вапняковий порошок	Ущільнення структури	Зменшення капілярних пор
Полідисперсний кварцовий пісок	Оптимальне пакування зерен	Зниження загальної пористості
Тонкі мінеральні частинки	Заповнення міжзернового простору	Формування мікропористої структури
Однорідний гранулометричний склад	Стабільність структури	Рівномірний розподіл пор

Джерело: узагальнено автором на основі [3; 4; 5, с. 138–139; 6; 8].

Таблиця 2

Взаємозв'язок характеристик порової структури та морозостійкості цементних композицій

Параметр порової структури	Характер впливу на матеріал	Вплив на морозостійкість
Велика кількість капілярних пор	Підвищене водопоглинання	Зниження морозостійкості
Наявність мікропор	Компенсація внутрішнього тиску льоду	Підвищення морозостійкості
Нерівномірний розподіл пор	Локальні напруження в структурі	Прискорене руйнування
Рівномірна мікропориста структура	Зменшення проникності	Підвищення довговічності

Джерело: узагальнено автором на основі [2; 10; 11; 13].

Таблиця 3

**Рекомендації щодо використання мінеральних наповнювачів
для підвищення морозостійкості сухих будівельних сумішей**

Напрямок оптимізації	Характеристика рішення	Очікуваний результат
Оптимізація гранулометричного складу	Використання полідисперсних фракцій піску	Зменшення пористості
Використання вапнякового порошку	Дрібнодисперсний мінеральний наповнювач	Ущільнення структури
Комбінування наповнювачів	Поєднання піску різної дисперсності	Стабільна мікропориста структура
Використання мінеральних добавок	Вторинні мінеральні матеріали	Підвищення довговічності

Джерело: власна розробка автора.

наповнювача на формування порової структури цементних композицій. Встановлено, що використання дрібнодисперсного вапнякового порошку та полідисперсного кварцового піску сприяє ущільненню структури цементного каменю і зменшенню об'єму капілярних пор. Проаналізовано взаємозв'язок між параметрами пористості та морозостійкістю матеріалу. Визначено, що рівномірний розподіл мікропор у структурі цементного каменю забезпечує зниження водопоглинання та підвищує стійкість матеріалу до циклів заморозування-відтавання. Сформовано рекомендації щодо оптимізації складу сухих будівельних сумішей шляхом раціонального підбору мінеральних наповнювачів різної дисперсності та використання вапнякового порошку як структуроутворювального компонента.

Практичне значення дослідження полягає в можливості підвищення морозостійкості та довговічності будівельних матеріалів за рахунок оптимізації мінерального складу наповнювачів. Наукова новизна роботи зводиться до систематизації впливу гранулометричних і мінералогічних характеристик піску та вапняку на формування порової структури сухих будівельних сумішей і визначенні їх ролі в підвищенні морозостійкості цементних композицій.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальне вивчення мікроструктурних процесів у модифікованих в'язучих системах із використанням різних фракцій мінеральних наповнювачів, а також на розроблення композицій сухих сумішей із підвищеною морозостійкістю для експлуатації в умовах різких кліматичних коливань.

Список літератури:

1. Zhang J. et al. Effect of aeolian sand on pore structure and frost resistance of foam concrete. *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 114. Article 114445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114445> (дата звернення: 10.03.2026).
2. Ding Z. et al. A study on the change in frost resistance and pore structure of concrete containing blast furnace slag under the carbonation conditions. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 331. Article 127295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127295> (дата звернення: 10.03.2026).
3. Zhang M. et al. Study on the frost resistance of composite limestone powder concrete against coupling effects of sulfate freeze-thaw. *Buildings*. 2023. Vol. 13. No. 11. Article 2776. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13112776> (дата звернення: 10.03.2026).
4. Jiang Z. et al. Limestone filler as a mineral additive on the compressive strength and durability of self-compacting concrete with limestone manufactured sand / *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 94. Article 109965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109965> (дата звернення: 10.03.2026).
5. Трикоз Л., Зінченко О., Никитинський А. Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів. *Будівництво та цивільна інженерія*. 2024. № 111. С. 135–141. DOI: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.17> (дата звернення: 10.03.2026).
6. Нестеренко М. Використання піску та вапняку як функціональних наповнювачів у модифікованих цементних в'язучих сумішах. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Інженерні науки*. 2025. Т. 1. № 2 (93). DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.23> (дата звернення: 10.03.2026).
7. Zeng H., Li Y. Effect of waste stone powder on compressive strength and pore structure of concrete in extreme low temperature and complex environment. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. Article 110108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110108> (дата звернення: 10.03.2026).
8. Zhou M., Dong W. The relationship between pore structure and strength of aeolian sand concrete under low temperature. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 80. Article 108067. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108067> (дата звернення: 10.03.2026).
9. Feng L., Cao H., Shi X., Wang D. Synergistic effect of rubber powder and nano-silica on pore structure and frost resistance of concrete. *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. P. 1–29. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-026-36480-8> (дата звернення: 10.03.2026).
10. Wang R. et al. Freeze-thaw deterioration characteristics and microstructural mechanisms of desert sand dry-mixed masonry mortar. *Journal of Building Engineering*. 2026. Vol. 120. Article 115564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2026.115564> (дата звернення: 10.03.2026).
11. Wu Q. et al. Influence of synthetic limestone sand on the frost resistance of magnesium potassium phosphate cement mortar. *Materials*. 2022. Vol. 15. No. 19. Article 6517. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15196517> (дата звернення: 10.03.2026).
12. Siamardi K., Shabani S., Mansourian A. Optimization of concrete mixes using mixture approach for slip-formed concrete pavement incorporating blends of limestone aggregates. *Construction and Building Materials*.

2023. Vol. 397. Article 132377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132377> (дата звернення: 10.03.2026).

13. Shen D., Yu Y., Jin Z., Li N. Effects of crumb rubber particles on the evolution of pore structure in steam-cured concrete under freeze-thaw cycles. *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 103. Article 112138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112138> (дата звернення: 10.03.2026).

14. Бондар А., Христич О., Бондар О., Сафроненко І. Перспективи використання вторинних відходів будівельної галузі у виробництві сухих будівельних сумішей. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. Т. 36. № 1. С. 64–70. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-64-70> (дата звернення: 10.03.2026).

15. Sharma S., Vyas A. K. A study on use of granite powder and crusher dust as fine aggregate in cement mortar. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 93. Part 3. P. 176–181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.115> (дата звернення: 10.03.2026).

Nesterenko M.B. INFLUENCE OF THE CHARACTERISTICS OF MINERAL FILLERS (LIMESTONE AND SAND) ON THE FORMATION OF THE PORE STRUCTURE AND FROST RESISTANCE OF DRY BUILDING MIXTURES

The intensive development of the construction industry necessitates increasing the durability and operational reliability of dry building mixtures used in masonry, plastering, and repair technologies. One of the key factors determining the resistance of such materials to climatic influences is the peculiarities of their pore-structure formation. The microstructure of cement stone directly affects water absorption, permeability and resistance to freezing and thawing cycles. In this context, the study of the role of mineral fillers of natural origin, in particular sand and limestone, in the structure-forming processes of cement compositions is of great importance. The study aims to establish the influence of the physicochemical and granulometric characteristics of mineral fillers on the formation of pore structure and frost resistance of dry building mixtures in modified binder systems. The methodological basis of the study is the generalization of modern scientific approaches to the analysis of the structure of cement compositions, the comparative analysis of the results of experimental studies, and the systematization of scientific data on the influence of granulometric and mineralogical characteristics of fillers on the structure of cement stone. As a result of the study, the patterns of influence of the dispersion and mineralogical composition of sand and limestone on the formation of cement microstructure were generalized. It was shown that the use of finely dispersed limestone powder contributes to the compaction of the cement stone structure and reduces the volume of capillary pores. It was proven that the combination of polydisperse quartz sand fractions provides more effective grain packing and the formation of a uniform microporous structure. The relationship between porosity parameters and frost resistance in cement compositions was established: a decrease in the number of open capillary pores and the formation of a micropore system increase the material's resistance to cyclic temperature effects. Based on the generalization of the obtained results, recommendations were formulated for optimizing the composition of dry building mixtures through the rational selection of mineral fillers with different dispersions. Prospects for further research include the experimental study of microstructural processes in modified binder systems using different fractions of natural and artificial mineral fillers, as well as the development of compositions for building materials for operation under conditions of sharp climatic fluctuations.

Keywords: mineral fillers, cement compositions, microstructure of cement stone, particle size distribution, durability of building materials, modified binder systems.

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 66.041.2:66.095.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/29>**Румянцева М.О.**<https://orcid.org/0009-0006-5674-6428>

Український державний університет науки і технологій

Мисов О.П.<https://orcid.org/0009-0005-3770-2166>

Український державний університет науки і технологій

Савченко М.А.<https://orcid.org/0009-0003-6520-7539>

Український державний університет науки і технологій

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ КРЕМНЕЗЕМУ СІРЧАНОКИСЛОТНИМ СПОСОБОМ (ЧАСТИНА II)

3

Досліджено три варіанти організації процесу осадження аморфного діоксиду кремнію сірчано-кислотним способом, який широко застосовується в промисловості для отримання високодисперсного кремнезему з регульованими фізико-хімічними властивостями. Розглянуто ступінчасту подачу кислоти, безперервну дозовану подачу та синхронне введення сірчаної кислоти й розчину силікату натрію в реакційний апарат. Зазначені способи відрізняються характером зміни рН середовища, швидкістю перебігу реакції нейтралізації, інтенсивністю тепловиділення та умовами масо- і теплообміну, що безпосередньо впливає на формування структури осаду, дисперсність частинок і стабільність технологічного режиму.

Моделювання процесу виконано в програмному середовищі ChemCAD із урахуванням матеріального і теплового балансів, кінетичних закономірностей реакції та параметрів теплообміну в апараті. Отримано залежності зміни концентрацій основних компонентів у часі, побудовано температурні профілі реакційної суміші та проаналізовано режими теплообміну для кожного варіанта організації процесу. Досліджено вплив способу подачі реагентів на стабільність температурного режиму, рівномірність перебігу процесу осадження та ефективність відведення тепла з реакційної зони.

Проведено порівняння стабільності процесу за величиною максимальних температурних відхилень, тривалістю перехідних процесів, часом встановлення стаціонарного режиму та інтегральною помилкою регулювання температури. Встановлено, що ступінчаста подача супроводжується локальними температурними піками та нерівномірним перебігом реакції, тоді як безперервна дозована подача забезпечує більш плавний і контрольований перебіг процесу. Найбільш ефективною виявилася синхронна подача реагентів, яка мінімізує температурні градієнти, підвищує стабільність технологічного режиму та забезпечує однорідність утвореного осаду, що робить її перспективною для практичного застосування у виробництві високодисперсного діоксиду кремнію.

Ключові слова: кремнезем, осадження, сірчано-кислотний метод, імітаційне моделювання, ChemCAD, температурна стабільність.

Постановка проблеми. Сучасні технології отримання високодисперсного кремнезему сірчано-кислотним способом характеризуються складною взаємодією хімічної кінетики, тепломасообміну та гідродинаміки. Особливістю процесу є інтенсивне тепловиділення під час нейтралізації силікату натрію, що призводить до локальних температурних градієнтів і нестабільності рН середовища. Це, у свою чергу, визначає морфологію частинок, питому поверхню та структурні

характеристики кінцевого продукту. У промислових умовах контроль зазначених параметрів ускладнюється через:

швидкоплинність реакцій, неоднорідність середовища, складність масштабування лабораторних результатів.

Традиційні експериментальні підходи потребують значних матеріальних і часових витрат, що обмежує можливість системного дослідження впливу режимів подачі реагентів. У зв'язку з цим

актуальним є застосування методів комп'ютерного моделювання, які дозволяють досліджувати процес у широкому діапазоні параметрів та прогнозувати поведінку системи без проведення великої кількості експериментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній хімічній технології комп'ютерне моделювання стало ключовим інструментом для дослідження та оптимізації процесів. Значна кількість робіт присвячена використанню спеціалізованих програмних пакетів, серед яких важливе місце займає ChemCAD.

У роботі Pérez-Sánchez та ін. [1] показано, що ChemCAD широко застосовується для моделювання складних хіміко-технологічних процесів, зокрема виробництва стиролу, з можливістю визначення матеріальних потоків і основних параметрів обладнання. Аналогічний підхід використано в дослідженні виробництва акрилової кислоти, де за допомогою ChemCAD проведено розрахунок матеріальних балансів та аналіз впливу температури і тиску на ефективність процесу.

У роботі Pérez-Sánchez та ін. [2,3] здійснено моделювання процесу отримання оксиду етилену, що підтверджує можливість застосування ChemCAD для опису реакційно-каталітичних систем і розрахунку теплових ефектів. Подібні підходи також використовуються для моделювання складних багатостадійних процесів, таких як перетворення CO_2 у рідкі палива з урахуванням кінетики реакцій і рециркуляції потоків [4].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням ChemCAD для аналізу процесів з інтенсивним тепломасообміном. Зокрема, при моделюванні реакційної дистиляції [5] показано, що результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними, що підтверджує адекватність застосування програмного комплексу для інженерних задач. Крім того, дослідження термодинамічних властивостей речовин у ChemCAD [6] демонструють достатньо високу точність розрахунків ентальпії, ентропії та фазової рівноваги, що є критично важливим для моделювання теплових режимів процесів.

Таким чином, аналіз літератури свідчить, що ChemCAD ефективно застосовується для:

- моделювання реакторів різного типу;
- розрахунку матеріальних і теплових балансів;
- дослідження впливу технологічних параметрів;
- оптимізації режимів роботи хімічних виробництв [7].

Разом з тим, незважаючи на значну кількість робіт, питання моделювання процесу осадження аморфного діоксиду кремнію сірчанокислотним

способом залишаються недостатньо дослідженими. Зокрема:

- відсутній системний аналіз впливу способу подачі реагентів на теплові режими;
- недостатньо вивчено динаміку зміни рН у поєднанні з тепловими ефектами;
- практично відсутні роботи, де здійснено порівняльне моделювання різних режимів подачі (ступінчастого, безперервного, синхронного) в єдиній постановці задачі.

Це визначає актуальність проведення дослідження, спрямованого на комплексне моделювання зазначеного процесу з використанням сучасних програмних засобів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є комп'ютерне моделювання процесу осадження аморфного діоксиду кремнію сірчанокислотним способом із використанням програмного комплексу ChemCAD та порівняльний аналіз ефективності різних способів подачі реагентів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити модель процесу осадження з урахуванням матеріального та теплового балансів;
- змоделювати три режими подачі реагентів: ступінчастий, безперервний та синхронний;
- визначити температурні профілі та динаміку зміни концентрацій компонентів;
- оцінити стабільність процесу за критеріями температурних відхилень і часу встановлення режиму;
- встановити найбільш ефективний режим, що забезпечує мінімальні температурні градієнти та однорідність осаду.

У раніше проведених дослідженнях [8] було розроблено модель процесу осадження кремнезему сірчанокислотним способом. Ця робота присвячена аналізу трьох способів подачі реагентів. Для дослідження було реалізовано три моделі:

Ступенева подача кислоти в реактор із розчином силікату натрію [9], рис. 1.

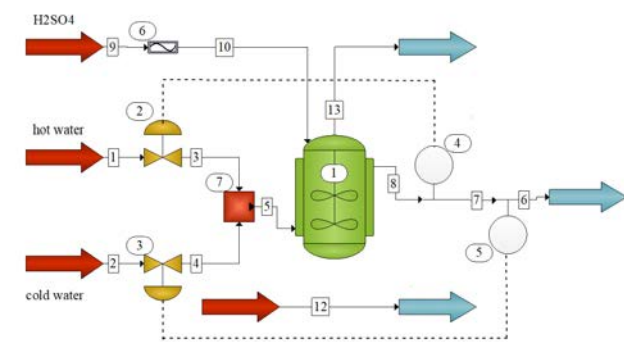


Рис. 1. Технологічна схема синтезу кремнезему із силікату натрію двоступеневим способом подачі кислоти

Передбачалося, що в початковий момент часу в реакторі 1 міститься розчин об'ємом 1 м³, який складається з 257,8 кг силікату натрію і 822,2 кг води. Щільність розчину 1080 кг/м³.

Імітацію подачі кислоти здійснювали програмно з використанням контролера RAMP (блок 6), її розділили на два умовні етапи.

- Перший етап тривав 10 хв за швидкості подачі кислоти 1,67 кг/хв, після чого відбувалася пауза 60 хв.

- Другий етап тривав 4 хв із витратою кислоти 5,34 кг/хв, потім передбачалася витримка. Загальна тривалість до завершення подачі кислоти становила 74 хв.

Безперервна дозована подача кислоти в реактор із розчином силікату натрію.

Технологічна схема синтезу кремнезему із силікату натрію за безперервного методу дозування кислоти аналогічна до схеми, наведеної на рис. 1. Відмінність полягає лише в програмі управління клапаном 8. У даному випадку моделювалася подача кислоти в одноступінчастому режимі зі швидкістю 0,52 кг/хв протягом 74 хв.

Одночасна (синхронна) дозована подача кислоти і розчину силікату натрію в реактор, рис. 2.

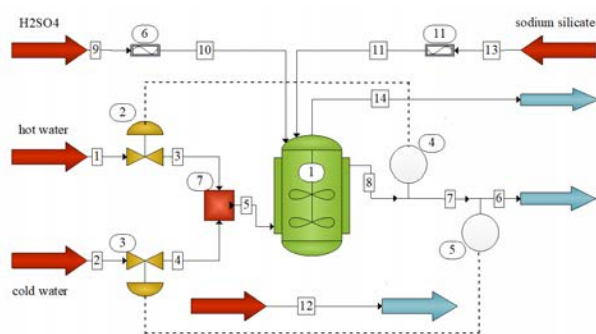


Рис. 2. Технологічна схема синтезу кремнезему із силікату натрію за одночасного дозованого способу подачі кислоти і розчину силікату натрію в реактор

У вихідному стані в реакторі (блок 1) містилося 822,2 кг води. Модель передбачала одночасну (синхронну) подачу сірчаної кислоти і силікату натрію. Витрата кислоти становила 0,52 кг/хв (блок 6), витрата силікату натрію – 3,48 кг/м³ (блок 11).

Виклад основного матеріалу

Ступенева подача кислоти в реактор

На рис. 3 представлено результати розрахунку зміни кількості компонентів за двоступеневого способу подачі реагентів. Характерною особливістю цього режиму є стрибкоподібне утворення мономерних сполук кремнієвої кислоти та сповільнений процес їх подальшої конденсації від-

повідно до реакції (2) синтезу кремнезему. На початковій стадії відбувається інтенсивне утворення побічних продуктів (сульфатів), після чого спостерігається поступове накопичення діоксиду кремнію.

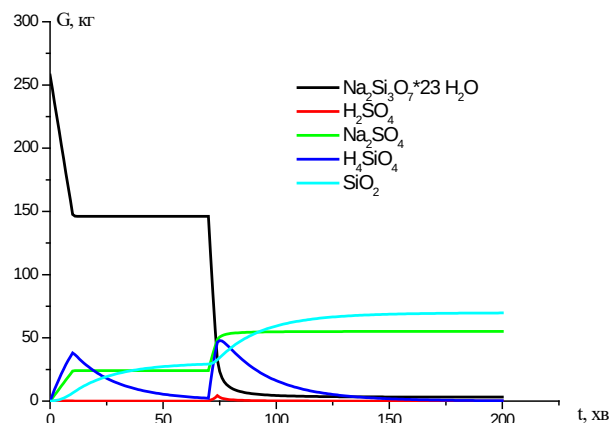


Рис. 3. Залежність кількості компонентів у реакторі від часу.
Спосіб осадження кремнезему двоступеневий

Як видно з рис. 4, утворення кремнезему збігається з найбільш різкою зміною температури реактора. Температурні коливання в межах 80-90 °C мають значний вплив на кінетику процесу і призводять до формування осаду з погіршеними фізико-хімічними властивостями (наприклад, зниженою питомою поверхнею і збільшеною щільністю агрегатів).

Таким чином, двоступеневий режим подачі реагентів характеризується нерівномірним перебігом реакцій, високою чутливістю до зміни температури і менш сприятливими умовами для отримання кремнезему необхідної якості.

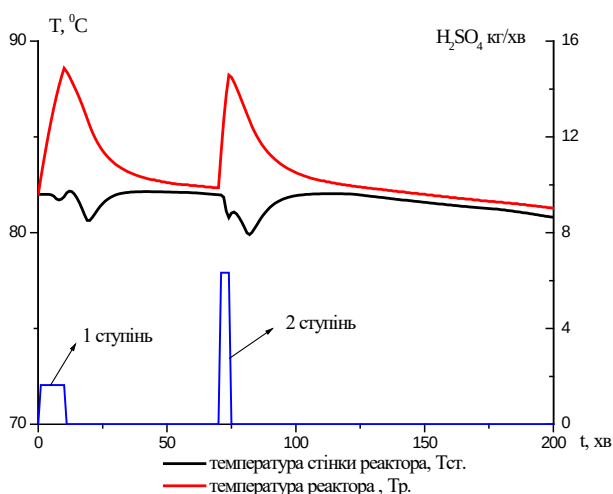


Рис. 4. Температура реактора і температура стінки реактора при двоступеневій подачі кислоти

На рис. 5 показано зміни витрати охолоджувальної та нагрівальної води під час регулювання температури реактора. Для двоступеневого способу подачі кислоти характерні різкі теплові збурення, що позначається на роботі клапанів системи охолодження і підігріву.

На початку кожного ступеня спостерігається стрибкоподібне зростання тепловиділення, пов'язане з інтенсивним утворенням мономерів і подальшою реакцією конденсації. У відповідь на це клапан подачі холодної води (синя лінія) відкривається практично повністю, забезпечуючи високу витрату (до 12-13 кг/хв). У міру зниження теплового ефекту подача холодної води поступово зменшується, і система повертається до підтримки базового рівня.

На другому етапі процес повторюється: під час надходження кислоти знову зростає теплове навантаження, і клапан охолодження відкривається до максимального значення. Надалі, у міру стабілізації реактора, витрата охолоджувальної води зменшується.

Паралельно з цим вмикається подача гарячої води (червона лінія), яка компенсує переохолодження системи і підтримує температуру в допустимому діапазоні. Витрата гарячої води зростає до кінця процесу, коли тепловиділення реакції знижується, і потрібен додатковий підігрів для утримання температури на заданому рівні.

Таким чином, робота клапанів у режимі П-регулятора за двоступеневої подачі кислоти має **імпульсний характер**:

- клапан охолодження реагує на швидкі сплески температури, відкриваючись майже миттєво і на значну величину;

- клапан води, що нагріває, вмикається з деяким запізненням і забезпечує поступову стабілізацію температурного режиму на завершальних стадіях.

Такий режим регулювання дає змогу утримувати температуру реактора в межах 80-90°C, проте супроводжується значними коливаннями витрат теплоносіїв, що вказує на високу нестійкість процесу і чутливість системи до збурень.

Безперервне дозоване подавання кислоти

Графік, представлений на рис. 6, ілюструє зміну кількості компонентів у реакторі в ході реакції за безперервної подачі сірчаної кислоти. Процес протікає більш плавно, без різких стрибків, що характерно для одноступеневої подачі. Тут спостерігається поступове утворення кремнезему, що свідчить про більш стабільну кінетику реакції. На відміну від двоступеневої подачі, процес у даному випадку йде рівномірно, що виключає сильні теплові піки і сприяє більш контрольованому процесу.

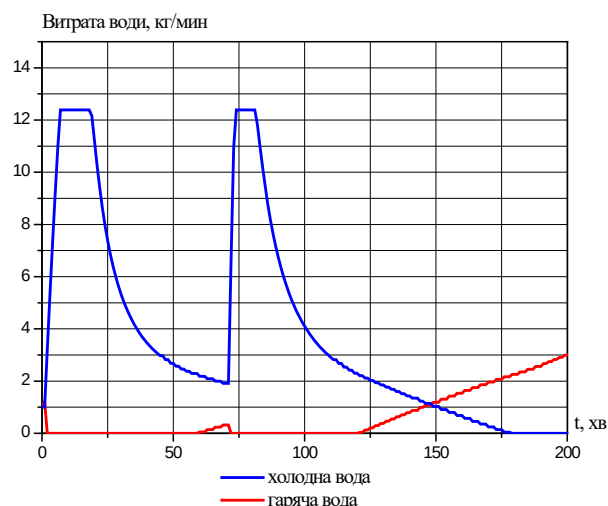


Рис. 5. Витрата води в сорочці охолодження і підігріву реактора при двоступеневій подачі кислоти

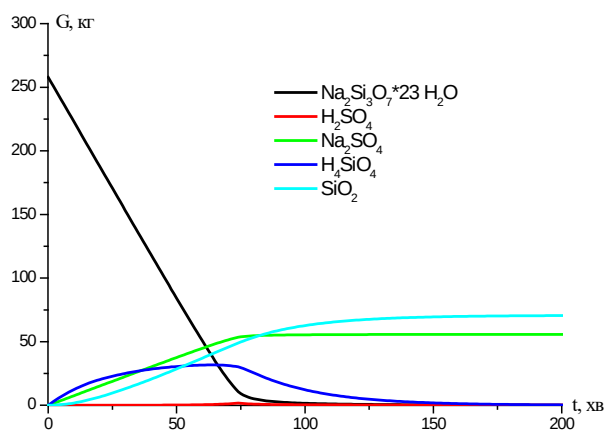


Рис. 6. Залежність кількості компонентів у реакторі від часу. Спосіб осадження кремнезему одноступеневий

Графік на рис. 7 показує стабільність температурного режиму за безперервної подачі кислоти. Температура в реакторі коливається, але залишається в межах оптимального діапазону. Ці коливання не такі виражені, як за двоступеневої подачі кислоти, завдяки більш рівномірному процесу подачі. Такий спосіб дає змогу підтримувати процес у заданому температурному режимі, що значно знижує ризик перегріву і сприяє отриманню кремнезему з більш стабільними характеристиками.

На рис. 8 зображено зміну витрати води, використаної для охолодження і підігріву реактора. На відміну від двоступеневого способу, тут витрата води змінюється плавно і не має різких стрибків, що свідчить про більш стійкий температурний режим у процесі. Це вказує на більш контрольовану та передбачувану поведінку системи теплообміну, що забезпечує надійну термостабільність процесу.

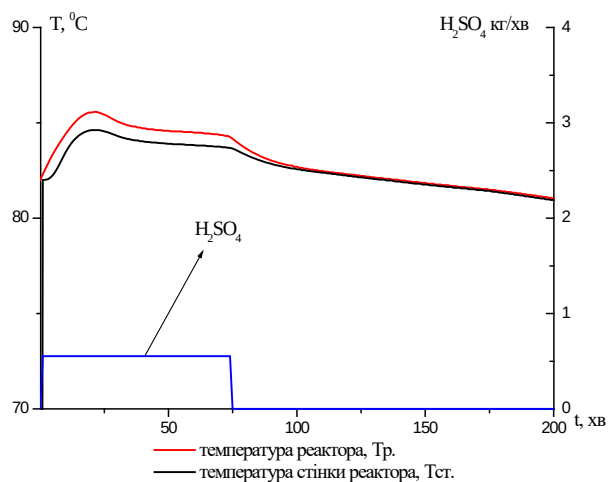


Рис. 7. Температура реактора і температура стінки реактора за одноступеневої подачі кислоти

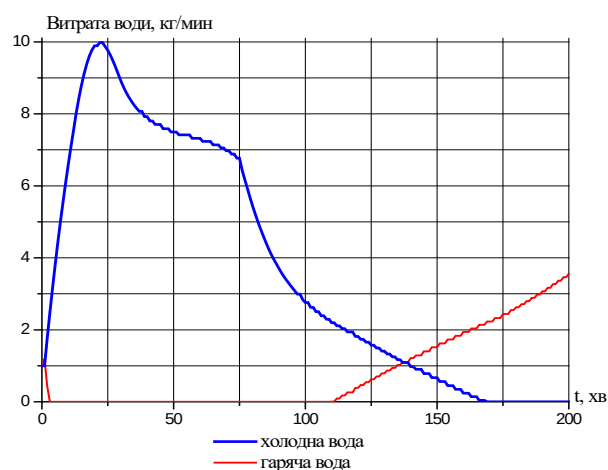


Рис. 8. Витрата води в сорочці охолодження і підігріву реактора за одноступеневої подачі кислоти

Синхронне подавання

На рис. 9 представлено динаміку зміни концентрацій компонентів у разі синхронної подачі сірчаної кислоти та силікату натрію. Одночасне дозування реагентів сприяє рівномірному протіканню процесу осадження та запобігає різким стрибкам в утворенні кремнезему. Порівняно з іншими методами, синхронна подача забезпечує більш стабільний вміст компонентів у реакційній суміші та виключає швидкі коливання в перебігу реакції, що дає змогу отримувати продукт із покращеними та відтворюваними характеристиками.

На рис. 10 показано динаміку температурного режиму реактора за синхронної подачі реагентів. Подача кислоти і силікату натрію в стехіометрично узгодженій пропорції знижує амплітуду

температурних коливань і запобігає локальним перегревам. На відміну від двоступеневого і безперервного методів дозування кислоти, цей спосіб забезпечує більш рівномірний тепловий баланс у реакторі, що сприяє формуванню кремнезему з оптимальними фізико-хімічними властивостями.

На рис. 11 наведено дані про зміну витрати охолоджувальної та нагріваючої води за синхронної подачі реагентів. Перевагою такого режиму є зниження перепадів у споживанні теплоносіїв, що вказує на більш стабільну роботу системи теплообміну. Одночасна подача кислоти і силікату натрію мінімізує температурні піки, знижує навантаження на систему охолодження і підігріву і робить процес більш енергоефективним і передбачуваним. Для порівняння, за двоступеневого методу аналогічні коливання виражені значно сильніше.

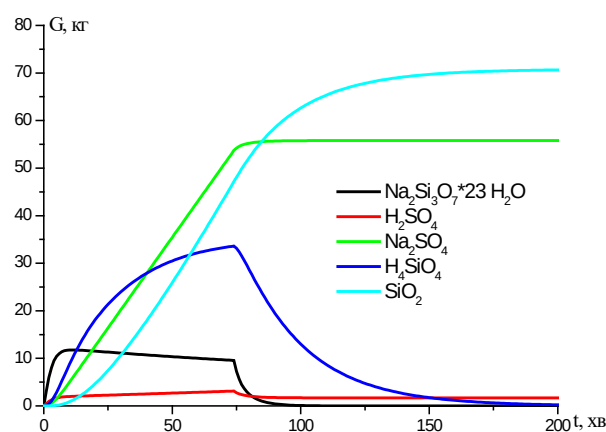


Рис. 9. Залежність кількості компонентів у реакторі від часу. Спосіб осадження кремнезему при одночасному дозуванні кислоти та силікату натрію

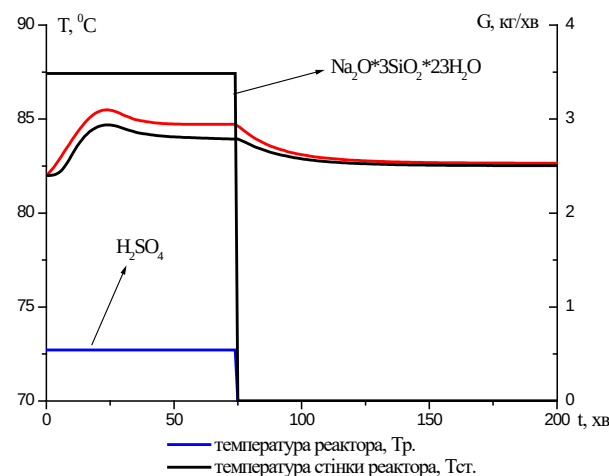


Рис. 10. Температура реактора і температура стінки реактора при одночасному дозуванні кислоти і силікату натрію

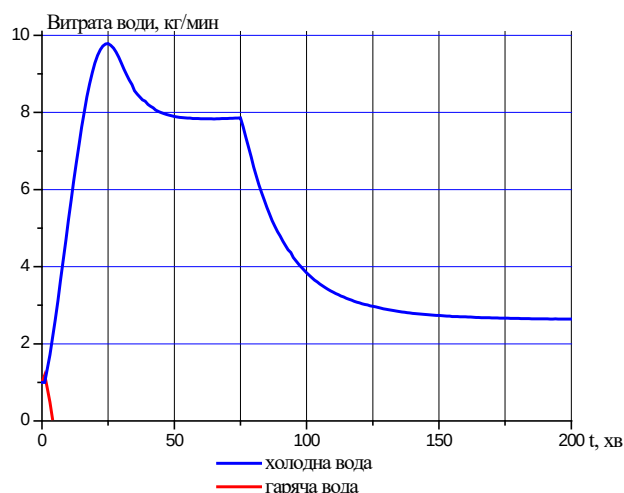


Рис. 11. Витрата води в сорочці охолодження і підігріву реактора при одночасному дозуванні кислоти і силікату натрію

Для порівняння різних способів подачі інгредієнтів було розраховано максимальне перерегулювання M_p [10],

$$M_p = \frac{T_{\max} - T_{\infty}}{T_{\infty}} \cdot 100\%,$$

де: $T_{\max}$ – максимальне значення температури в реакторі,
 T_{∞} – стала температура ($\approx 82^\circ\text{C}$ на всіх графіках)
і, безрозмірна, нормована інтегральна помилка за модулем ε [11],

$$\varepsilon = \frac{1}{T_{\infty} T_o} \int_0^{T_o} (T(t) - T_{\infty}) dt,$$

де $T_o = 200$ хв, вказаний час процесу.

Результати зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Результати порівняння способів подачі інгредієнтів

Варіант подачі інгредієнтів	M_p , %	ε	Час вирівнювання температури, хв
Двоступенева	8.0	0.027	180
Безперервна дозована	4.3	0.013	130
Синхронна	4.2	0.009	110

Як видно з таблиці, синхронний спосіб найстабільніший, і хоча максимальна температура відхилення від заданої близька до температури за безперервного способу, інтегральна нерівномірність і час стабілізації істотно менші. Двоступеневий спосіб дає найбільше відхилення температури і часу стабілізації.

Висновки. Двоступеневий спосіб (рис. 3-4) характеризується стрибкоподібною зміною концентрацій проміжних і кінцевих продуктів. На першій стадії утворюється значна кількість мономерів

і побічних сполук, а на другій – відбувається різке накопичення діоксиду кремнію. Цей процес супроводжується коливаннями температури в діапазоні $80-90^\circ\text{C}$, що негативно позначається на фізико-хімічних властивостях кінцевого продукту.

За одноступеневого способу подачі кислоти (див. рис. 2) процес протікає більш рівномірно. Реагент подається з постійною швидкістю, що сприяє поступовому утворенню мономерів кремнієвої кислоти та їх подальшій поліконденсації в діоксид кремнію. У цьому разі температурний режим реактора відносно стабільний, що дає змогу формувати осад з більш однорідними структурними характеристиками.

Синхронна подача кислоти і силікату натрію являє собою найстабільніший метод з мінімальними температурними коливаннями і рівномірним розподілом реагентів. Це дає змогу досягти високих показників якості кремнезему і стабільності процесу. Одночасна подача сірчаної кислоти і силікату натрію безпосередньо в реактор у заданій стехіометричній пропорції – перспективний спосіб, особливо з точки зору термічної стабільності. Такий підхід може забезпечити:

Температурна стабільність. За рахунок рівномірного й одночасного надходження реагентів екзотермічна реакція протікає не стрибкоподібно, а поступово, що знижує локальні перегріву.

Керованість процесу. Можливість реалізації автоматизованого управління співвідношенням потоків, що дає змогу стабільно підтримувати рН і температуру в межах оптимуму (наприклад, $\sim 82^\circ\text{C}$).

Висока однорідність осадження. За правильно підібраних швидкостей подачі забезпечується постійна зона осадження і рівномірний розподіл частинок, що покращує дисперсні характеристики кремнезему.

Мінімізація перевантажень теплообмінної системи. Відсутність різких температурних стрибків знижує навантаження на сорочки і теплообмінники, спрощуючи їхній розрахунок і експлуатацію. Однак, такий метод не позбавлений деяких недоліків:

Необхідність більш високого ступеня автоматизації.

Складнощі в регулюванні початку осадження. Реакція починається негайно під час зіткнення реагентів. Тому зона контакту має бути ретельно продумана, інакше може виникнути локальне перенасичення, що призведе до коагуляції та утворення великих часток або навіть гелю.

Підвищені вимоги до дозувальних систем. Для забезпечення синхронності та стабільності подачі обох реагентів необхідні високоточні насоси або витратоміри. Порушення співвідношення потоків моментально змінює рН і умови осадження.

Складнощі масштабування. При переході з лабораторного на пілотний і промисловий рівні важливо точно відтворювати гідродинаміку змі-

шування. В іншому разі може виникнути неоднорідність продукту за партіями.

Обмеження за типом продукту. Цей метод найкраще підходить для отримання дрібнодисперс-

ного аморфного кремнезему. Для пористих форм або структурованих матеріалів, де потрібне поетапне осадження, може знадобитися складніша подача.

Список літератури:

1. Pérez-Sánchez A., Pérez-Sánchez E. J., Segura Silva R. M. Simulation of the styrene production process via catalytic dehydrogenation of ethylbenzene using CHEMCAD®. *Tecnura*. 2017. Vol. 21, No. 53. P. 15–31. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257054721002>.
2. Pérez-Sánchez A., Pérez-Sánchez E. J., Segura Silva R. M. Simulation of the acrylic acid production process through catalytic oxidation of gaseous propylene using ChemCAD® simulator. *Ingeniare*. 2019. Vol. 27, No. 1. P. 142–150. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000100142>.
3. Pérez-Sánchez A., Baltá García J. G., Montalván Viart J. R., Ranero González E., Pérez-Sánchez E. J. Simulation of the ethylene oxide production process in ChemCAD® simulator. *Revista Ciencia y Tecnología*. 2022. Vol. 24, No. 3. P. 15–24. DOI: <https://doi.org/10.36995/j.recyt.2022.37.002>.
4. Meiri N., Radus R., Herskowitz M. Simulation of novel process of CO₂ conversion to liquid fuels. *Journal of CO₂ Utilization*. 2017. Vol. 17. P. 284–289. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.347-353.3706>.
5. Wang X. G., Yang Y. Y. Simulation of reactive distillation process with ChemCAD. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 347–353. P. 3706–3709. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.347-353.3706>.
6. Comparison of pure component thermodynamic properties from CHEMCAD with direct calculation using the Peng–Robinson equation of state. *Chemical Data Collections*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2020.100571>.
7. Bridging industry, research, and classroom using ChemCAD simulation. *Education for Chemical Engineers*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2026.100506>.
8. Румянцева М.О., Мисов О.П. Комп'ютерне моделювання процесу осадження кремнезему сірчанокислотним способом (частина 1). *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2025. Том 36, № 6. С. 125–136. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/29>.
9. Process for the preparation of precipitated silicas having morphology similar to pyrogenic silicas: пат. US 4127641 A, МПК C01B 33/12 / R. K. Iler, J. R. McKay ; E. I. du Pont de Nemours and Company. Заявл. 03.06.1977 ; опубл. 28.11.1978. URL: <https://patents.google.com/patent/US4127641A/en>.
10. Ogata K. *Modern Control Engineering*. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. 894 p. URL: https://mechfamily-ju.com/storage/images/files/file_17314308026pQTy.pdf.
11. Åström K.J., Hägglund T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. 2nd ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995. 343 p. URL: <https://reviewbooku.com/review/pid-controllers-theory-design-and-tuning-4974125>.

Rumiantseva M.O., Mysov O.P., Savchenko M.A. COMPUTER MODELING OF THE SILICA PRECIPITATION PROCESS BY THE SULFURIC ACID METHOD (PART II)

Three variants of organizing the precipitation process of amorphous silicon dioxide using the sulfuric acid method, which is widely applied in industry for the production of highly dispersed silica with controlled physicochemical properties, were investigated. Stepwise acid addition, continuous metered feeding, and synchronous introduction of sulfuric acid and sodium silicate solution into the reactor were considered. These methods differ in the pattern of pH variation in the reaction medium, the rate of the neutralization reaction, the intensity of heat release, and the conditions of mass and heat transfer, which directly affect the formation of the precipitate structure, particle dispersion, and the stability of the technological regime.

Process simulation was performed in the ChemCAD software environment taking into account material and heat balances, kinetic characteristics of the reaction, and heat transfer parameters in the reactor. Dependencies of the concentration changes of the main components over time were obtained, temperature profiles of the reaction mixture were constructed, and heat transfer modes were analyzed for each process configuration. The influence of the reagent feeding method on the stability of the temperature regime, the uniformity of the precipitation process, and the efficiency of heat removal from the reaction zone was investigated.

A comparison of process stability was carried out based on the magnitude of maximum temperature deviations, the duration of transient processes, the time required to reach steady-state conditions, and the integral temperature control error. It was established that stepwise feeding is accompanied by local temperature peaks and a non-uniform course of the reaction, whereas continuous metered feeding ensures a smoother and more controlled process. The most effective approach was found to be the synchronous feeding of reagents, which minimizes temperature gradients, increases the stability of the technological regime, and ensures the uniformity of the formed precipitate, making it a promising method for practical application in the production of highly dispersed silicon dioxide.

Keywords: silica, precipitation, sulfuric acid method, simulation modeling, ChemCAD, thermal stability.

Дата першого надходження статті до видання: 09.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Смірнов Д.О.

<https://orcid.org/0009-0003-7601-525X>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Ушаков Д.Р.

<https://orcid.org/0000-0002-7272-0862>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ ЦЕМЕНТНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АЛЮМІНАТІВ І ЦИРКОНАТІВ БАРІЮ

Розробка вогнетривких будівельних матеріалів передбачає створення відповідних в'язучих, що поєднують гідравлічну активність з високою термостійкістю і хімічною стабільністю. Хоча окремі дослідження присвячені двокомпонентним системам $BaO-Al_2O_3$ і $BaO-ZrO_2$, питання формування фазового складу і механізмів гідратації алюмоцирконобарієвих цементів у трикомпонентній системі $BaO-Al_2O_3-ZrO_2$ залишається відкритим. Роль основних мінеральних фаз, умови їх появи і вплив на структуру і властивості цементного каменю недостатньо зрозумілі. Тому є необхідність у розгляді теоретичних аспектів процесів фазоутворення і гідратації в системах алюмоцирконобарієвих цементів. Мета дослідження – теоретичне обґрунтування формування алюмоцирконобарієвих цементів у системі $BaO-Al_2O_3-ZrO_2$ та визначення впливу основних фаз на фізико-хімічні властивості матеріалу. Досліджено фазовий склад системи, утворення алюмінатів і цирконатів барію – їх кристалічні характеристики, морфологія і густина. Розглянуто механізми гідратації, утворення гідроалюмінатів барію та гелеподібних продуктів гідратації, а також вплив цирконатних і силікатних фаз на стабілізацію мікроструктури цементного каменю. Виявлено, що моноалюмінат барію визначає ранню міцність цементу завдяки високій гідравлічній активності, а цирконат барію – термостійкість і стабільність структури при високих температурах. Виявлено утворення комплексної багатокомпонентної матриці з гідроалюмінатів, гідросилікатів барію та гідроксидів цирконію і алюмінію, що сприяє високій щільності, механічній міцності і вогнетривкості матеріалу. Результати узагальнюють сучасні дані щодо фазоутворення, механізмів гідратації та впливу складу на експлуатаційні властивості алюмоцирконобарієвих цементів. Встановлені оптимальні співвідношення алюмінатних і цирконатних фаз, які забезпечують комбінацію гідравлічної активності і високої термостійкості цих матеріалів, зроблених перспективними для виготовлення жаростійких бетонів, футеровок теплообмінної техніки та інших високотемпературних конструкцій.

Ключові слова: алюмоцирконобарієві цементи, моноалюмінат барію, моноцирконат барію, гідроалюмінати барію, гідратація, термостійкість, фазовий склад, радіаційно стійкі матеріали, вогнетривкі матеріали.

Постановка проблеми. Цементні матеріали із заданими функціональними властивостями є окремою тематикою сучасного матеріалознавства. Традиційні цементні системи на основі портландцементу не завжди забезпечують потрібної хімічної стійкості, термостійкості та стабільності структури при агресивних чи високотемпературних умовах [1–3]. Це підштовхує до пошуку альтернативних в'язучих систем, здатних до формування стабільної мікроструктури і до забезпечення довговічності.

Серед перспективних неорганічних сполук особливу увагу привертають алюмінати і цирконати лужноземельних металів, зокрема барію, які вирізняються високою термічною стабільністю, значною хімічною інертністю і здатністю до утворення кристалічних фаз зі стабільною кристалічною решіткою [4; 5]. Комбінація алюмінатних і цирконатних компонентів у складі цементних систем може впливати на процеси гідратації, фазоутворення та структуроутворення матеріалу й таким чином визначати

фізико-механічні та експлуатаційні характеристики цементних систем [6; 7].

Незважаючи на те, що є дослідження, що зосереджені на окремих сполуках барію в кераміці чи вогнетривких матеріалах, питання формування цементних систем на основі алюмінатів і цирконатів барію поки що достатньо не вивчені. В науковій літературі мало уваги приділяється закономірностям взаємодії таких сполук у в'язучих композиціях, умовам утворення стабільних фаз та впливу мінералогічного складу на процеси тверднення цементу та формування його структури [8; 9].

Недостатня систематизація теоретичних уявлень про механізми формування таких цементних систем ще більше ускладнює можливості їх властивостей і стримує розробку нових композиційних матеріалів із заданими характеристиками [10; 11]. Тому є необхідність у узагальненні і аналізі теоретичних підходів до формування цементних систем на основі алюмінатів і цирконатів барію, що дозволить окреслити основні напрямки фазоутворення, структуроутворення і стабілізації їхніх властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження цементних систем на основі алюмінатів і цирконатів барію лежать на стику кількох галузей матеріалознавства: хімії високоалюмінатних цементів, термодинаміки оксидних систем і технології вогнетривких бетонів [1; 12]. У літературі загалом описуються фазові склади систем $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$, їхня гідратаційна активність і застосування для отримання матеріалів із підвищеною термостійкістю і радіаційною стійкістю.

Однією з головних проблем є вивчення ролі барію в одержанні цементів і склокристалічних матеріалів. Внесення барієвих сполук у силікатні і боросилікатні системи підвищує їхню щільність і здатність поглинати іонізуюче випромінювання, що розширює коло застосувань таких складів для захисних конструкцій [2]. Подібні властивості мають барієві цементи і бетони, що використовуються як конструкційні і радіаційно-захисні матеріали у збірках [3]. Виявлено також, що іони барію можуть впливати на процеси зв'язування хлоридів у цементній матриці, модифікуючи механізми утворення гідратних фаз і збільшуючи довговічність матеріалу [10; 13].

Інші дослідження пов'язані з заміною барієм алюмінатів у вогнетривких цементах [14; 15]. У дослідженні Н. Халіла показано, що цементи на основі барій-алюмінатних і барій-цирконатних фаз утворюють сталі структури, стійкі до високих температур і агресивних металургій-

них середовищ, що дозволяє використовувати їх у футеруванні теплових агрегатів сталеплавильної промисловості [7]. Заходи щодо властивостей вогнетривких бетонів свідчать, що композиції з великим вмістом оксидів алюмінію і цирконію характеризуються високою термічною стабільністю, малою повзучістю і збереженням міцності при температурах, що перевищують 1500 °C [4]. Подібні підходи реалізуються також у розробці цирконійвмісних в'язучих речовин, які забезпечують одержання термостійких бетонів з покращеною стабільністю структури [16].

Важливість термодинаміки оксидних систем, які включають BaO і Al_2O_3 , для розуміння формування цементних систем. Вивчення термодинаміки системи $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ дозволило виявити стабільні алюмінатні фази, що визначають фазовий склад і температурні межі існування матеріалів на їх основі [17].

У результаті виконаних розрахунків для складних $(\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba})\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Cr}_2\text{O}_3$ систем було уточнено порядки величин та умови спільного існування стабільних фаз, а також визначено області складів, які є оптимальними для розвитку сучасних вогнетривких матеріалів [8]. Подібні результати створюють теоретичну базу для передбачення фазового складу цементних систем з введенням цирконію та інших модифікуючих компонентів.

Властивості композицій на основі оксидів алюмінію і цирконію значною мірою залежать від мікроструктури матеріалу і рівня внутрішніх напружень. Відомо, що розвиток композитів $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$ визначається технологією їх синтезу і формування структури і має вирішальне значення їх міцність і стабільність [9]. Аналогічні закономірності можна спостерігати в цементних системах, де взаємодія алюмінатних і цирконатних фаз визначає формування щільної кристалічної матриці.

Перспективним напрямком є також використання барійвмісних відходів як активних компонентів цементних композицій. Так, доведено, що барієвий шлак може бути використаний як добавка до лужно-активованих цементів, сприяючи формуванню стабільних гідратних фаз і підвищенню механічних характеристик матеріалу [6]. Питання реакційної здатності мінеральних компонентів цементних систем розглядається також у роботах, присвячених розробці методів для прискореної оцінки пуцоланової активності та гідратаційних процесів [5], а також у дослідженнях, присвячених визначенню реакційної здатності склобою в цементних композиціях [1].

Суттєвий інтерес в контексті барійвмісних цементних систем представляють дослідження О. Миргорода, Г. Шабанової та інших авторів, в яких запропоновані підходи до планування експериментів при розробці алюмінатних цементів з барійвмісними компонентами для вогнетривких бетонів [12]. Подальші дослідження цих авторів присвячені оптимізації складу вогнетривких цементів з використанням техногенних відходів хімічної промисловості, що дозволяє поєднати високі експлуатаційні властивості матеріалу із забезпеченням ресурсоефективності [14].

В деяких дослідженнях системи $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$ показана також можливість стабілізації структури цементу за рахунок введення іонів Ba^{2+} , Cu^{2+} або Bi^{3+} , які змінюють характер гідратації і впливають на формування кристалічних фаз [11]. Такі підходи показують потенціал регулювання структури і властивостей в'язучих матеріалів за рахунок модифікації їх хімічного складу.

В загальному можна підкреслити, що вивчення фахової літератури дає підстави стверджувати, що цементні системи на основі алюмінатів і цирконатів барію відзначаються високою термічною стійкістю, радіаційно-захисними властивостями та здатністю формувати щільні кристалічні структури. Водночас питання про механізми кристалізаційних перетворень в системі $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$ і взаємодії алюмінат- і цирконат-компонентів у процесах гідратації залишаються відкритими. Саме ці проблеми є напрямками досліджень з метою створення нових вогнетривких цементних систем із заданими властивостями.

Постановка завдання. Метою роботи є представлення теоретичного обґрунтування закономірностей формування цементних систем у трикомпонентній системі $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$, визначення фазового складу алюмоцирконобарієвих цементів і встановлення ролі основних алюмінатних і цирконатних фаз барію у процесах гідратації і формуванні структури цементного каменю.

Виклад основного матеріалу. Алюмоцирконобарієві цементні є однією з різновидів спеціалізованих цементів, спосіб одержання та фізико-хімічні властивості яких визначаються комплексом фаз на основі барію, алюмінію та цирконію. Основу таких систем становлять алюмінати і цирконати барію, які утворюються під час високотемпературного спікання відповідних оксидних або карбонатних сумішей. Інтерес до подібних систем викликаний їх стабільністю при високих температурах, здатністю формувати щільну кристалічну структуру та підвищеною

хімічною стійкістю порівняно із звичайними алюмінатними цementsами.

В'язучі властивості алюмоцирконобарієвих цементів залежать від фазового складу системи $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$ і дисперсності компонентів, що утворюються протягом синтезу. Найбільший інтерес у промисловості для отримання алюмоцирконобарієвих представляє область цієї системи, де утворюються моноалюмінатбарію ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) і моноцирконат барію (BaZrO_3). Перший характеризується високою гідралічною активністю, а другий – високою вогнетривкістю і стабільністю при підвищених температурах. Поєднання цих двох фаз може дати цементні розчини, які тверднуть у водному середовищі та можуть витримувати високі температури.

Складові, розташовані поза зоною існування даних фаз, практично не мають в'язучих властивостей. Їх можна використовувати як сировину для виготовлення вогнетривів або як наповнювач вогнетривких бетонів. У цих випадках вони більш цінні за своїх термостійких та хімічно інертних властивостей, а не за можливістю твердіння у воді.

Для отримання цементних розчинів з високою гідралічною активністю і термостійкістю (приблизно до 2273 К і вище), найкраще використовувати склади із збалансованим співвідношенням алюмінатної та цирконатної частин. Такі розчини мають кілька переваг. Вони формують систему мінералів з досить високою реакційною здатністю у воді. Цементні розчини мають високу температуру плавлення, що визначає термостійкість матеріалу. У них немає вільного ZrO_2 , який не бажаний через можливі поліморфні перетворення, що супроводжуються оборотними об'ємними змінами і можуть викликати тріщини. Крім того, при оптимальному складі мінімізується кількість фаз, які негативно впливають на міцність і термостійкість цементу. Алюмоцирконобарієвий цемент належить до найбільш швидко тверднучих в'язучих матеріалів. При гідратації він дає інтенсивне утворення гідроалюмінатів барію та гелевидних продуктів гідратації, що і обумовлює формування щільної структури цементного каменю. Дослідження сучасних цирконійвмісних алюмінатних цементів показують, що включення цирконієвих фаз сприяє стабілізації структури гідратів і покращує жаростійкість цементних композицій, що особливо важливо для застосування у вогнетривких бетонних системах і високотемпературних конструкційних матеріалах.

При виробництві алюмоцирконобарієвого цементу часто використовують цирконієву руду,

яка містить багато кремнезему. У таких випадках поряд з алюмінатами і цирконатами барію можуть утворюватися силікати барію. Їх наявність змінює фазовий склад цементу і може впливати на кінетику гідратації і термостійкість матеріалу. При контрольованому вмісті ці фази не погіршують властивостей цементу і навіть можуть сприяти формуванню більш щільної структури при високотемпературному твердінні.

Особливістю алюмоцирконобарієвих цементів є їх підвищена гідралічна активність (особливо у вологих умовах твердіння). В даному випадку цирконат барію також приймає участь у формуванні гелевидних продуктів гідратації, які і ущільнюють поверхню цементного каменю і сприяють збільшенню його механічних властивостей. Алюмоцирконобарієві цементи є гідралічними в'язучими матеріалами і мають високу термостійкість, їх можна використовувати у жаростійких бетонах, футеровках теплової техніки і конструкцій, що працюють при підвищених температурах (табл. 1).

Відхилення значень вогнетривкості, представлених у табл. 1 не перевищують 30 К. Це підтверджує термічну стійкість системи $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$.

Алюмінати барію можуть утворюватися як у результаті плавлення суміші оксидів, так і внаслідок реакції твердою фазою при спіканні. З точки зору отримання клінкеру для цементу більш доцільним є саме твердою фазою, оскільки це дозволяє краще контролювати співвідношення фаз та отримувати необхідні мінеральні компоненти за відсутності повного плавлення системи.

Найбільш важливими алюмінатами барію є кілька стехіометричних сполук, які відрізняються співвідношенням барію і алюмінію оксидів, а також кристалічною структурою [3].

Моноалюмінат барію ($\text{BaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) утворюється при високих температурах та характеризу-

ється більшою розчинністю у воді та відповідною гідратаційною активністю. У цементних системах ця фаза може проявляти гідралічну активність, оскільки здатна утворювати гідратовані алюмінатні сполуки барію. Температура плавлення моноалюмінату барію складає більше 2000 К, що свідчить про його стабільність при високих температурах.

Трибарієвий алюмінат ($3\text{BaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) містить найбільший вміст оксиду барію серед алюмінатів і належить до найбільш основних фаз системи $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$. Для нього характерні швидке схоплювання і висока первинна міцність при гідратації, через що ця фаза вважається однією з ключових для розвитку ранньої міцності алюмоцирконобарієвих цементів. Температура плавлення цієї сполуки знаходиться в межах від 1783 до 1940 К.

Ще однією стабільною фазою в системі є гексаалюмінат барію ($\text{BaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ або $\text{BaAl}_{12}\text{O}_{19}$). Він утворюється за великого надлишку алюмінію і характеризується високою температурою плавлення і стабільністю. У порівнянні з більш основними алюмінатами, ця фаза практично не володіє гідралічними властивостями і виконує переважно роль термостійкого структурного компонента. Завдяки шаруватій будові гексаалюмінат барію має високу вогнетривкість і стабільність при високих температурах [7].

Цирконати барію утворюються в системі $\text{BaO}-\text{ZrO}_2$ і грають важливу роль у формуванні термічної та хімічної стійкості матеріалів. Найбільш відомими є моноцирконат (BaZrO_3) та дицирконат барію (Ba_2ZrO_4).

Моноцирконат барію має перовськітоподібну кристалічну структуру та характеризується високою температурою плавлення, що перевищує 2900 К. Ця фаза характеризується високою хімічною інертністю, низькою розчинністю у воді і стабільністю при нагріванні. Завдяки цим властивостям вона широко вивчається як компонент вогнетрив-

Таблиця 1

Значення вогнетривкості складів системи $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$

№ складу	BaO, % мас.	Al ₂ O ₃ , % мас.	ZrO ₂ , % мас.	Вогнетривкість розрахункова, К	Вогнетривкість експериментальна, К	Відхилення, %
1	60	10	30	2533	2523	0,40%
2	56	8	36	2643	2673	-1,12%
3	58	20	22	2293	2323	-1,29%
4	50	25	25	2253	2253	0,00%
5	25	50	25	2073	2073	0,00%
6	25	25	50	2203	2203	0,00%
7	29	59	12	2093	2073	0,96%
8	10	60	30	2093	2093	0,00%
9	10	40	50	2073	2093	-0,96%

Джерело: систематизовано на основі [4; 7].

ких матеріалів, електрокераміки та стабільних оксидних систем. В цементних композиціях цирконат барію може виступати як структуроутворююча та стабілізуюча фаза, що збільшує стійкість матеріалу до високих температур і агресивних середовищ.

Дицирконат барію менш стабільний у вологому середовищі. Він може піддаватися гідролізу, при чому частина структури руйнується, особливо у разі підвищених температур. Тому ця фаза розглядається як така, що є менш стабільною у вологому середовищі.

У системі $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$ фазоутворення відбувається внаслідок складних реакцій оксидів, які входять до складу клінкеру. Велика частина досліджень присвячена опису бінарних систем $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{BaO}-\text{ZrO}_2$ і $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$, і їх фазовим діаграмам. Вони дозволяють визначити температурні області стабільності основних мінеральних фаз, умови їх появи і переходів між фазами.

У трикомпонентній системі $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$ можливе формування комплексу фаз, що включає різні алюмінати та цирконати барію, а також тверді розчини на їх основі. Взаємодія цих сполук під час спікання визначає мікроструктуру клінкеру і подальші процеси гідратації цементу. Наявність цирконатних фаз може сприяти стабілізації структури матеріалу, зменшенню термічних деформацій і збільшенню довговічності цементного каменю.

Сучасні дослідження свідчать, що додавання цирконію в барієві алюмінатні системи може покращувати їх термічну стабільність, зменшувати швидкість фазових переходів при нагріванні і збільшувати стійкість до корозії. Тому алюмоцирконобарієві цементи розглядаються як перспективні матеріали для виготовлення спеціальних вогнетривких і термостійких композицій, які можуть застосовуватися в умовах високих температур, агресивних газових середовищ і значних

термомеханічних навантажень (табл. 2).

Алюмоцирконобарієві цементи є різновидом швидкотвердіючих цементів, що набирають міцність при тиску близько 50 МПа вже через добу та 80 МПа через тиждень після замішування. Температура вогнетривкості цементу коливається в межах 2093–2323 К, залежно від співвідношення компонентів, основними фазами є моноалюмінат барію ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) і моноцирконат барію (BaZrO_3). У певних умовах можуть з'являтися трибарієвий алюмінат ($3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), проте його кристалічна структура нестабільна і відсутня міжзернова міцність, тому в алюмоцирконобарієвому цементі небажана присутність пентабарієвого алюмінату ($5\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$).

Гідратація моноалюмінату барію може давати різні гідрати, зокрема: $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $2\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, що мають важливе значення для механічних властивостей цементу. З часом вони можуть трансформуватися в більш стабільний $3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ з виділенням гелю $\text{Al}(\text{OH})_3$. Спершу виділяється багато гелю, потім формуються кристалогідрати $3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. У підсумку продуктами гідратації є гель гідроксиду алюмінію і $3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Діаграма стану системи $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ при 303 К свідчить, що при концентраціях BaO до 52% і Al_2O_3 до 2,8% стабільним є гіббсит, а при концентраціях BaO від 52,9 до 55,5% і Al_2O_3 до 2,7% – $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. У вузькому діапазоні можливе утворення $2\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ і $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Схема гідратаційних перетворень алюмоцирконобарієвого цементу включає наступні стадії:

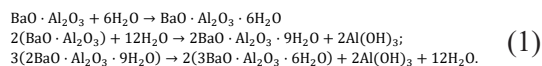
1. Гідратація моноалюмінату барію ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$):

Таблиця 2

Кристалографічні характеристики алюмінів і цирконатів барію

Сполука	Формула	Кристалічна система	Морфологія (габітус) кристалів	Густина, г/см ³	Показники заломлення світла
Алюмінати барію					
Барій алюмінат	$3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	гексагональна, псевдокубічна	волокнисті, табличчасті кристали	4,54	$n = 1,735$
Барій моноалюмінат	$\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	-	-	3,99	$n = 1,683$
Барій гексаалюмінат	$6\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	гексагональна	пластинчасті кристали	3,69	$n_\alpha = 1,730$; $n_\beta = 1,724$
Цирконати барію					
Барій цирконат	$\text{BaO} \cdot \text{ZrO}_2$	кубічна	ізометричні кристали	6,24	$n \approx 2,15$
Дибарій цирконат	$2\text{BaO} \cdot \text{ZrO}_2$	ромбічна	призматичні кристали	5,98	-

Джерело: систематизовано на основі [3; 4; 7; 17].

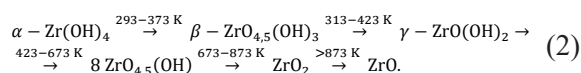


Особливості: утворюються метастабільні гідратні сполуки, які з часом можуть переходити у стабільніші форми.

Гідратація цирконату барію в звичайних умовах дуже повільна, з утворенням $\text{Zr}(\text{OH})_4$ і $\text{Ba}(\text{OH})_2$. Остаточні продукти гідратації не містять останнього через карбонізацію у присутності CO_2 .

Гелеподібний гідроксид цирконію на стадії «старіння» частково дегідратується і утворюється стабільніша і міцніша структура цементу. Залежно від умов і тривалості «старіння», гідроксид цирконію може знаходитись у чотирьох різних формах α -, β -, γ - і δ - що відрізняються за структурою чотиричленного циклу Zr, реакційною здатністю і фізико-хімічними властивостями і допомагає сформувати щільнішу і стійкішу мікроструктуру цементу.

Процес перетворення цирконію гідроксиду, в залежності від температури, протікає згідно реакції [8]:



Механізм формування твердого цементного каменю включає утворення первинного гелю ($\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{Zr}(\text{OH})_4$) та формування кристалогідратів $3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Постійне ущільнення та дегідратація гелю цирконію є ключовим для стабілізації структури та формування щільної мікроструктури з високою міцністю та вогнетривкістю.

Структури гідроксиду цирконію різних модифікацій відрізняються видами містків, що з'єднують атоми цирконію. В α -модифікації атоми цирконію пов'язані подвійними гідроксильними містками, у β -модифікації спостерігається чергування подвійних гідроксильних і кисневих містків. У γ -модифікації атоми цирконію з'єднані лише кисневими містками, а δ -модифікація характеризується циклічними структурами з кисневими зв'язками [9].

Хімічна активність гідроксиду цирконію знижується у напрямку від α - до δ -модифікації, що пов'язано з можливістю доступу атомів цирконію для реакції. У продуктах гідратації алюмоцирконобарієвого цементу, ймовірно, формуються переважно α - та β -гідроксусірконій, які і обумовлюють гідравлічну активність цементу. Імовірність утворення γ - та δ -гідроксусірконію низька, оскільки для їх появи необхідні підвищені температури понад 313 К.

Гідратація алюмоцирконобарієвого цементу протікає за тим же механізмом, що і гідратація основних мінералів $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ і BaZrO_3 , але зна-

чно повільніше, ніж гідратація чистого $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Аналіз вмісту елементів у розчині під час гідратації показує, що швидкість і ступінь розчинення алюмоцирконобарієвого цементу в основному залежать від розчинення моноалюмінату барію. Молярне співвідношення $\text{BaO} : \text{Al}_2\text{O}_3$ у розчині, що гідратується, близько одиниці, що свідчить про формування гідроалюмінатів барію складу $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Результати розчинності та калориметрії показують, що наявність цирконату барію уповільнює швидкість гідратації, що сприяє підвищенню міцності цементного каменю [5].

Аналіз у світловому мікроскопі свідчить, що гідроалюмінати барію утворюються у вигляді дрібних кристалів, ясно світловідбиваючих (показник заломлення $n \approx 1,54$), характерних для $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ і $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Основною частиною продуктів гідратації є гелева фаза, що складається з гідроалюмінатів барію, гідроксиду алюмінію і гідроксиду цирконію. Гідроксид цирконію створює тонкий шар на поверхні зерен BaZrO_3 , що і обумовлює додаткову міцність структури.

Гідроксид цирконію у продуктах гідратації алюмоцирконобарієвого цементу можна досить чітко виявити за допомогою диференціального термічного аналізу. В кінці гідратації цементів, що містять BaZrO_3 , можна спостерігати екзотермічний ефект біля 623 К, що відповідає кристалізації гелеподібного гідроксиду цирконію, особливо після тривалого дозрівання цементу.

Міцність цементного каменю, який пропадає при гідратації алюмоцирконобарієвого цементу, залежить від складу і структури продуктів гідратації. Основними фазами, що утворюються в процесі твердіння і надають механічну міцність матеріалу, є гідроалюмінати барію типу $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, а також гелеподібні і кристалічні продукти гідратації – гідроксид цирконію $\text{Zr}(\text{OH})_4$ і гідроксид алюмінію $\text{Al}(\text{OH})_3$. Сукупність цих сполук формує просторово зв'язану мікроструктуру цементного каменю, яка визначає його механічні властивості, густину і стійкість до впливу зовнішнього середовища.

При алюмоцирконобарієвому цементі, що містить силікатні фази барію, зокрема сполуку $2\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2$, процес гідратації супроводжується утворенням більш широкого спектра гідратних новоутворень. Окрім гідроалюмінатів барію формуються гідросилікати барію, а також гідроксиди цирконію і алюмінію. Така багатоконпонентна система продуктів гідратації сприяє формуванню більш щільної і структурно стабільної матриці цементного каменю [5; 7].

Гідратація моноалюмінату барію, що входить у алюмоцирконобарієвий цемент, супроводжується

швидким розчиненням мінеральної фази і утворенням гідроалюмінатів різного ступеня гідратації. Ці процеси забезпечують інтенсивний початковий розвиток міцності цементного каменю.

Силікат барію $2\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2$ також активно залучається до гідратаційних процесів. Його реакція з водою є досить інтенсивною з утворенням гіросилікатів барію і гідроксиду барію. Гідратні новоутворення з'являються майже відразу після замісу цементу водою. Вже впродовж першої доби твердіння можна побачити утворення добре окристалізованих фаз у вигляді гексагональних призм або їх скупчень. Такі кристали мають індекси заломлення близько $n \approx 1,548$ та $n \approx 1,542$ відповідно, що відповідає гідратній сполуці $\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

В процесі подальшого твердіння й тривалої гідратації, яка може продовжуватись і понад місяць, мікроструктура гідратованих зразків зазнає додаткових змін. В системі можуть з'являтися нові кристалічні фази гідроксиду барію, наприклад $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Такі процеси можуть бути пов'язані із перебудовою мікроструктури цементного каменю і частковим пере кристалізацією раніше утворених гідратів.

В цілому поєднання гідроалюмінатних, гіросилікатних і цирконійвмісних гелеподібних фаз в продуктах гідратації алюмоцирконобарієвого цементу формує складну багатокомпонентну структуру. Саме така структура визначає високу міцність на початковому етапі гідратації, стабільність при підвищених температурах і добру термостійкість матеріалу, важливі властивості для жаростійких бетонів і вогнетривких композитних матеріалів.

Висновки. Дослідження теоретичних основ формування цементних систем у трикомпонентній системі $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$ показало, що їхні властивості залежно від співвідношення алю-

мінатних та цирконатних компонентів. Основні мінеральні фази, які визначають гідравлічні властивості алюмоцирконобарієвих цементів, це моноалюмінат барію ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) та моноцирконат барію (BaZrO_3). Моноалюмінат барію характеризується високою гідратаційною активністю і визначає інтенсивний початковий розвиток міцності, а цирконат барію виконує переважно стабілізуючу роль, підвищуючи термічну та хімічну стійкість матеріалу.

Показано, що при гідратації алюмоцирконобарієвих цементів утворюються гідроалюмінати барію різного ступеня гідратації, а також гелеподібні продукти гідратації – гідроксид алюмінію та гідроксид цирконію. Сукупність цих фаз формує щільну просторово зв'язану мікроструктуру цементного каменю, що забезпечує високу ранню міцність, низьку пористість та стабільність при підвищених температурах. Наявність цирконатних фаз уповільнює швидкість гідратації, сприяючи більш рівномірному формуванню структури та збільшенню довговічності матеріалу.

Визначено, що оптимальні склади алюмоцирконобарієвих цементів формуються у області системи $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$, де одночасно присутні алюмінатні та цирконатні фази барію. За таких умов забезпечується поєднання гідравлічної активності цементу з високою вогнетривкістю та термостійкістю, що дозволяє використовувати ці матеріали у вогнетривких бетонах, футеровках теплових агрегатів та інших високотемпературних конструкціях.

Отримані узагальнення підтверджують перспективність алюмоцирконобарієвих цементів як спеціальних в'язких матеріалів для створення термостійких композицій і можуть послужити основою для подальшого вдосконалення їх складу та технології синтезу.

Список літератури:

1. Ajadi M. O. Characterization of cullet hardened reactivity in cementitious compositions. *LAUTECH Journal of Civil and Environmental Studies*. 2024. Vol. 13, № 1. <https://doi.org/10.36108/laujoces/4202.31.0150>
2. Al Huwayz M., Basha B., Alalawi A., Alrowaili Z. A., Sriwunkum C., Alsaiani N. S., Al-Buriah M. S. Influence of BaO addition on gamma attenuation and radiation shielding performance of $\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SrO}-\text{ZrO}_2$ glasses. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2024. Vol. 17, № 4. Article 101119. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.101119>
3. Shabanova H. N., Korohodska A. N., Kustov M. V., Khrystych E. V., Lohvinkov S. M., Ivashchenko M. Y., Taraduda D. V. Barium-containing cement and concrete for protection against electromagnetic radiation. *Functional Materials*. 2021. Vol. 28, № 2. <https://doi.org/10.15407/fm28.02.323>
4. ElKhatib L. W., Khatib J., Assaad J. J., Elkordi A., Ghanem H. Refractory concrete properties – a review. *Infrastructures*. 2024. Vol. 9, № 8. Article 137. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9080137>
5. Seraj S., Juenger M. C. G. Evaluation of an accelerated characterization method for pozzolanic reactivity. In: *SP-312: Novel Characterization Techniques and Advanced Cementitious Materials: Tribute to James J. Beaudoin*. American Concrete Institute. 2016. Vol. 312. P. 1–16. <https://doi.org/10.14359/51689364>
6. Huang X., Xin C., Li J.-S., Wang P., Liao S., Poon C. S., Xue Q. Using hazardous barium slag as a novel admixture for alkali activated slag cement. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 125. Article 104332. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104332>

7. Khalil N. M. Refractory concrete based on barium aluminate–barium zirconate cements for steel-making industries. *Ceramics International*. 2005. Vol. 31, № 7. P. 937–943. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2004.09.020>
8. Korohodskaya A. N., Shabanova G. N., Logvinkov S. M., Khrystych O. V., Volobuev M. M. Calculation of eutectics temperatures and compositions of multicomponent sections of the system (Mg, Ca, Sr, Ba) O–Al₂O₃–Cr₂O₃. *Scientific Research on Refractories and Technical Ceramics*. 2021. № 121. P. 94–102. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.121.10>
9. Li H.-Y., Zhang L., Liu X.-G., Wan D., Bao Y. Effects of residual stress on the flexural strength and microstructure of Al₂O₃–ZrO₂ composites fabricated by different methods. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*. 2025. Vol. 20, № 1. <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00216-9>
10. Luo Z., Zhi T., Liu X., Yin K., Pan H., Tan H., Feng H. Effect of slowly released barium ions on chloride binding in Portland cement paste. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 408. Article 133595. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133595>
11. Madej D., Boris R. Synthesis, characterization and hydration analysis of Ba²⁺-, Cu²⁺- or Bi³⁺-doped CaO–Al₂O₃–ZrO₂-based cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019. Vol. 138, № 6. P. 4331–4340. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08142-7>
12. Myrgorod O., Shabanova G., Ruban A., Shvedun V. Experiment planning for prospective use of barium-containing alumina cement for refractory concrete making. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 330–335. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.330>
13. Prasad Kumara P. A. A. S., Cooper P. R., Cathro P., Gould M., Dias G., Ratnayake J. Bioceramics in endodontics: limitations and future innovations – a review. *Dentistry Journal*. 2025. Vol. 13, № 4. Article 157. <https://doi.org/10.3390/dj13040157>
14. Shabanova H. M., Korohodskaya A. M., Hamova O. O., Levadna S. V. Optimizing the compositions of refractory cements produced using the waste of chemical industry. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2022. № 5. P. 115–121. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2022-144-5-115-121>
15. Supornpun N., Oster M., Phasuk K., Chu T.-M. G. Effects of shade and thickness on the translucency parameter of anatomic-contour zirconia, transmitted light intensity, and degree of conversion of the resin cement. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2021. Vol. 129(1). P. 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.04.019>
16. Taranenkova V. V., Shabanova H. M., Pitak Y. M., Sharapov M. I., Kapustyak A. Y. Using zirconium-containing binders for obtaining refractory concretes. *Scientific Research on Refractories and Technical Ceramics*. 2023. № 122–123. P. 49–54. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.122-123.05>
17. Tyurnina N. G., Lopatin S. I., Balabanova E. A., Shugurov S. M., Tyurnina Z. G., Polyakova I. G. Thermodynamic properties of the BaO–Al₂O₃ system. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Vol. 969. Article 172266. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172266>

Smirnov D.O., Ushakov D.R. THEORETICAL ASPECTS OF FORMATION OF CEMENT SYSTEMS BASED ON BARIUM ALUMINATES AND ZIRCONATES

The development of refractory building materials involves the creation of appropriate binders that combine hydraulic activity with high thermal resistance and chemical stability. Although some studies are devoted to the two-component systems BaO–Al₂O₃ and BaO–ZrO₂, the question of the formation of the phase composition and hydration mechanisms of aluminium-zirconium-barium cements in the three-component system BaO–Al₂O₃–ZrO₂ remains open. The role of the main mineral phases, the conditions for their appearance and the influence on the structure and properties of cement stone are not sufficiently understood. Therefore, there is a need to consider theoretical aspects of the processes of phase formation and hydration in aluminium-zirconium-barium cement systems. The purpose of the study is to theoretically substantiate the formation of aluminium-zirconium-barium cements in the BaO–Al₂O₃–ZrO₂ system and determine the influence of the main phases on the physicochemical properties of the material. The phase composition of the system, the formation of aluminates and barium zirconates – their crystalline characteristics, morphology and density were investigated. The mechanisms of hydration, the formation of barium hydroaluminates and gel-like hydration products, as well as the influence of zirconate and silicate phases on the stabilization of the microstructure of cement stone were considered. It was found that barium monoaluminate determines the early strength of the cement due to its high hydraulic activity, and barium zirconate – heat resistance and stability of the structure at high temperatures. The formation of a complex multicomponent matrix of hydroaluminates, barium hydrosilicates and zirconium and aluminium hydroxides was revealed, which contributes to the high density, mechanical strength and refractoriness of the material. The results summarize current data on phase formation, hydration mechanisms and the influence of composition on the performance properties of aluminium-zirconate-barium cements. The optimal ratios of aluminate and zirconate phases have been established, which provide a combination of hydraulic activity and high thermal stability of these materials, making them promise to produce heat-resistant concretes, linings of heat exchange equipment and other high-temperature structures.

Keywords: aluminium-zirconate-barium cements, barium monoaluminate, barium monozirconate, barium hydroaluminates, hydration, thermal stability, phase composition, radiation-resistant materials, refractory materials.

Дата першого надходження статті до видання: 17.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Фролова Л.А.

<https://orcid.org/0000-0001-7970-2264>

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Салтиков Д.Ю.

<https://orcid.org/0000-0001-5403-4773>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Мандрика А.Г.

<https://orcid.org/0000-0001-8760-4760>

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Фролов О.О.

<https://orcid.org/0009-0007-8484-775X>

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СИНТЕЗУ НА МІКРОХВИЛЬОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОБАЛЬТОВОГО ФЕРИТУ

Удосконалення матеріалів, що поглинають мікрохвильове випромінювання, є важливим напрямом досліджень впродовж останніх років. Ферити кобальту та композити на його основі широко використовують для поглинання радіолокаційних сигналів та зменшення електромагнітних перешкод завдяки їх специфічним магнітним та діелектричним властивостям. В представленій роботі виконано синтез фериту кобальту плазмовим методом. За допомогою повного факторного експерименту, що базується на результатах отриманих методом електронної парамагнітної резонансної (ЕПР) спектроскопії, рентгенофазового аналізу, резонансного методу було визначено вплив рН реакційного середовища, температури і тривалості обробки. В якості функцій відгуку використовували інтенсивність піків на ЕПР спектрах, резонансне поле з ЕПР спектру, ширину полоси поглинання з ЕПР спектру, тангенс куту втрат, коефіцієнт поглинання з ЕПР спектрів. Статистичний аналіз дав змогу кількісно оцінити вплив параметрів синтезу на обрані функції відгуку. Результати показали, що кислотність реакційного середовища є параметром, який найбільше впливає на фазовий склад, властивості поглинання електромагнітного випромінювання зразків, отриманих плазмовим методом. Встановлено, що рН є домінуючим фактором перш за все для таких функцій відгуку, як інтенсивність ліній ЕПР спектру, ширина полоси поглинання, резонансне поле. Спостерігається синергізм впливу часу та рН. Збільшення температури сприяє розширенню лінії та формуванню інтенсивного сигналу ЕПР, особливо за високому рН. Максимальні значення рН, тривалості обробки, температури призводять до максимальної інтенсивності лінії ЕПР спектру та збільшення ширини лінії поглинання.

Ключові слова: ферит кобальту, плазмовий синтез, рентгенофазовий аналіз, ЕПР-спектроскопія, планування експерименту.

Постановка проблеми. Величезний попит на нанорозмірні ферити зумовлює значну увагу науковців до розробки технологій їх синтезу та вивчення фізико-хімічних властивостей [1].

Удосконалення матеріалів, що поглинають мікрохвильове випромінювання, є найважливішою галуззю досліджень у різних сферах засто-

сування, таких як зв'язок, радіаційне медичне опромінення, електронна боротьба, протиповітряна оборона та різні цивільні застосування. Шпінельні ферити та композити на їх основі широко використовують для поглинання радіолокаційних сигналів та зменшення електромагнітних перешкод завдяки їх сильним магнітним та

діелектричним втратам на високих частотах [2]. Ці ферити класифікуються на основі таких властивостей, як магнітні, електричні, діелектричні, механічні, магнітострикційні та оптичні характеристики. Ця класифікація забезпечує широкий спектр застосування в електроніці, телекомунікаціях та магнітних пристроях. Конкретні ферити, включаючи нікель-цинковий ферит ($\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$), мідь-кобальтовий ферит ($\text{CuCoFe}_2\text{O}_4$), марганець-цинковий ферит ($\text{MnZnFe}_2\text{O}_4$) та нікель-кобальтовий ферит ($\text{NiCoFe}_2\text{O}_4$), детально досліджуються на предмет їх здатності до мікрохвильового поглинання. Вибір фериту для мікрохвильового поглинання залежить від таких факторів, як мікрохвильова частота, склад, товщина, геометрія та умови навколишнього середовища. Ці ферити володіють сильними магнітними властивостями, високою проникністю, високим електричним опором, водночас є економічно ефективними, довговічними та екологічно чистими [3].

У зв'язку з цим за останнє десятиліття з'явилося безліч технологій одержання феритів кобальту. Ці технології дають змогу отримувати матеріали, що демонструють широкий спектр властивостей таких, як висока намагніченість, помірна проникність та магнітні втрати [4]. Магнітні та діелектричні властивості, такі як намагніченість насичення, проникність, діелектрична проникність та питомий опір, можуть бути відрегульовані шляхом вибору як технології отримання, так і зміни параметрів синтезу. Оптимальні технології можуть покращити не тільки магнітні та електричні властивості, але і посилити магнітокристалічну анізотропію [5].

Кобальтовий ферит (CoFe_2O_4), що синтезується золь-гель методом використовували для створення композитів з поліаніліном [6]. Композитний матеріал продемонстрував ширший діапазон частот поглинання та максимальні втрати на відбиття – 28,4 дБ (99,8% поглинання потужності) на частоті 8,1 ГГц та – 9,6 дБ (>90% поглинання потужності) на частоті 11,2 ГГц. Також результати показали, що товстіші композити (4 мм), демонструють кращий показник електромагнітної перешкоди порівняно з тоншими (0,19, 0,19, 0,3 мм). Це може бути пов'язано з низьким пропусканням електромагнітної хвилі від композитів.

Представлені також дослідження впливу концентрації фериту кобальту на ефективність екранування від електричних, теплових, механічних, магнітних та електромагнітних перешкод зразків композиту епоксид/графен/кобальт-ферит [7]. Максимальне значення міцності на розрив 21,6 МПа спостерігалася для зразка з 7% CoFe_2O_4 . Зразок з 15% CoFe_2O_4 продемонстрував максимальну намагніченість насичення 7,5 А м²/кг.

TG-DTA показав термічну деградацію всіх зразків до 800°C. Максимальна ефективність екранування, 16 дБ, спостерігалася для зразка з 7% CoFe_2O_4 у діапазоні частот Х та 22 дБ для зразка з 10% CoFe_2O_4 у діапазоні частот Ку. Композити продемонстрували чудові властивості поглинання порівняно з відбиттям у обох діапазонах частот Х та Ку. Використання гідротермального синтезу збільшило властивості поглинання мікрохвильового випромінювання, а мінімальні втрати на відбиття спостерігалися на частоті 10-12 ГГц. Для синтезу нанокомпозитів на основі кобальт-марганцево-шпінельного фериту було застосовано новий гідротермальний метод з використанням хни, а також мікрохвильового випромінювання. Нанокомпозити продемонстрували феромагнітну поведінку зі значеннями намагніченості насичення (M_s) від 23,53 до 55,15 Ам²/кг. Це дослідження підкреслює потенціал гідротермального методу з використанням мікрохвильового випромінювання та зеленої хни для контрольованого синтезу нанокомпозитів на основі заміщеного кобальтшпінельного фериту з регульованими властивостями для різноманітних застосувань [8].

Ферити $\text{Co}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ були синтезовані керамічним способом та спіканням за допомогою мікрохвиль. Встановлено, що початкова магнітна проникність як функція температури демонструє квазіоднорідну поведінку зерен. $\text{Co}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ демонструє високу загальну ефективність екранування 55,96 дБ, що свідчить про те, що майже 99,999% вхідного електромагнітного випромінювання ефективно зменшується цим матеріалом, що робить їх дуже корисними для військової (радарі і стелс) та електронної промисловості [9].

Постановка завдання. Однак більшість досліджень засновані на визначенні впливу складу на магнітні або діелектричні властивості. У цій роботі ми зосередилися на визначенні впливу параметрів синтезу на фазовий склад та показники поглинання, що дає змогу обрати оптимальні параметри синтезу радіопоглинаючих матеріалів.

Основною метою даної роботи є синтез феритів кобальту плазмовим методом та дослідження їх структурних і поглинальних властивостей.

Виклад основного матеріалу.

Методика проведення дослідів

Отримання зразків здійснювалося шляхом зливання при безперервному перемішуванні відповідної суміші 0,5 М розчинів кобальт(II) сульфату, ферум(II) сульфату з необхідним мольним співвідношенням катіонів кобальту до феруму. Необхідне рН отримували шляхом додавання розчину 1М NaOH, з подальшою обробкою плазмовим розрядом. Опис установки наведено в роботі [10].

Концентрація катіонів кобальту визначалася комплексометрично, катіонів феруму – перманганатним методом. Для контролю ходу реакції реактор був забезпечений електродною системою, що включає в себе скляний електрод ЕСЛ 43-07 для вимірювання рН, платиновий електрод для вимірювання окислювального потенціалу і електрод порівняння ЕВЛ-1МЗ. Всі осади промивалися до негативної реакції на сульфат-іон. Після витримки осад відокремлювали шляхом магнітної сепарації. Відмиті і відфільтровані осади сушили за температури 130°C.

Рентгенофазовий аналіз проводили на рентгеновському дифрактометрі ДРОН-3 в монохроматизованому Со-К α випромінюванні ($\lambda=1,7902\text{Å}$). Ідентифікацію сполук проводили шляхом порівняння міжплоскостних розташувань (d , Å) і відносних інтенсивностей (I/I_0) експериментальної кривої за даними електронної картки PCPDFWIN.

Спектри ЕПР були отримані за допомогою радіоспектрометра Radiopan SE/X-2543. Для характеристики сигналів ЕПР використовували резонансне поле, ширину полоси поглинання ЕПР спектру, питоме поглинання.

На підставі попередніх експериментів, нами були обрані в якості основних технологічних параметрів, що впливають на властивості продуктів, вихідне рН розчину, час обробки плазмою, температура проведення процесу. В якості граничних умов були запропоновані наступні значення впливових чинників (табл. 1)

Таблиця 1
Впливові фактори та план проведення експериментів

Фактор	Назва	Значення	
		максимум	мінімум
X_1	Температура, °C	40	20
X_2	Час проведення процесу, хвил.	20	5
X_3	рН	12,0	8,0
№	Закодовані значення параметрів		
	t	τ	рН
1	1	1	1
2	-1	1	1
3	1	-1	1
4	-1	-1	1
5	1	1	-1
6	-1	1	-1
7	1	-1	-1
8	-1	-1	-1

Був створений план повного трифакторного експерименту типу 2^3 для вивчення впливу параметрів синтезу на магнітні характеристики фериту

кобальту, отриманого за допомогою обробки плазмою (таблиця 1).

У таблиці 1, (-1), (+1) представляють собою закодовані значення коефіцієнтів для мінімального і максимального рівнів відповідно. На основі даних статистичного аналізу можна отримати математичну модель, що описує процес для обраних рівнів.

Для повного 3-факторного експерименту математичне рівняння, що описує цю систему, має вигляд:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (1)$$

де y_i – залежна змінна (функція відгуку)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ – коефіцієнти, відповідні незалежним змінним,

$\beta_{12}, \beta_{23}, \beta_{13}$ – коефіцієнти при парних взаємодіях незалежних змінних.

Розрахунок моделі і подальша оптимізація були виконані за допомогою програми STATISTICA 10.0. Для отриманих моделей проводили перевірку значущості факторів, адекватності моделі за критерієм Фішера, аналіз дисперсії, аналіз діаграм Парето.

Рентгенофазовий та структурний аналіз зразків

На рис. 1 показано рентгенограми, отримані для плазмохімічно синтезованих зразків. На рентгенограмах наявні піки, що відповідають кристалічному фериту CoFe_2O_4 з кубічною структурою типу шпінелі з просторовою групою Fd-3m. Відповідно до картки ICDD 22-1086 (піки відповідають $d=4,88, 2,94, 2,51, 2,08, 1,7, 1,61, 1,48, 1,322$) для зразків 1,2,4.

Додаткові піки, що відповідають пікам гематиту, спостерігаються за рН=8. Однак у зразку 4 присутня невелика кількість $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, що видно з малоінтенсивних відповідних піків.

Зразки, отримані за рН=8, демонструють ширші піки, ніж у зразках, отриманих за рН=12, що вказує на менший розмір частинок. Зразки, отримані за рН=12, мають більш інтенсивні піки, що характерно для високо кристалічної фази (рис. 1(1-4)).

У порівнянні зі зразками, синтезованими за $t=20^\circ\text{C}$ (рис. 1(5-8)), тільки зразки, синтезовані при максимальних рівнях рН і часу, показали досить інтенсивні піки.

На рис. 2 (а, б) представлені ЕПР спектри синтезованих зразків згідно плану (табл. 1). Зі збільшенням рН вихідного розчину відбувається зміна форми та інтенсивності спектрів ЕПР зразків. Спектри ЕПР зразків 1-4 мають специфічний

вигляд, що вказує на наявність магнітної фази. Для зразка 2 спостерігається найбільший пік, що зумовлено присутністю найбільш магнітної фази та більшою кристалічністю. При збільшенні часу обробки інтенсивність піків значно зменшується, що корелює з результатами рентгено-

нофазового аналізу і пов'язано з утворенням вторинних фаз. При цьому асиметрія спектрів ЕПР зростає. Однокомпонентний і достатньо вузький (порівняно зі спектрами інших зразків) ЕПР спектр зразку 1, може бути пояснений однофазним складом.

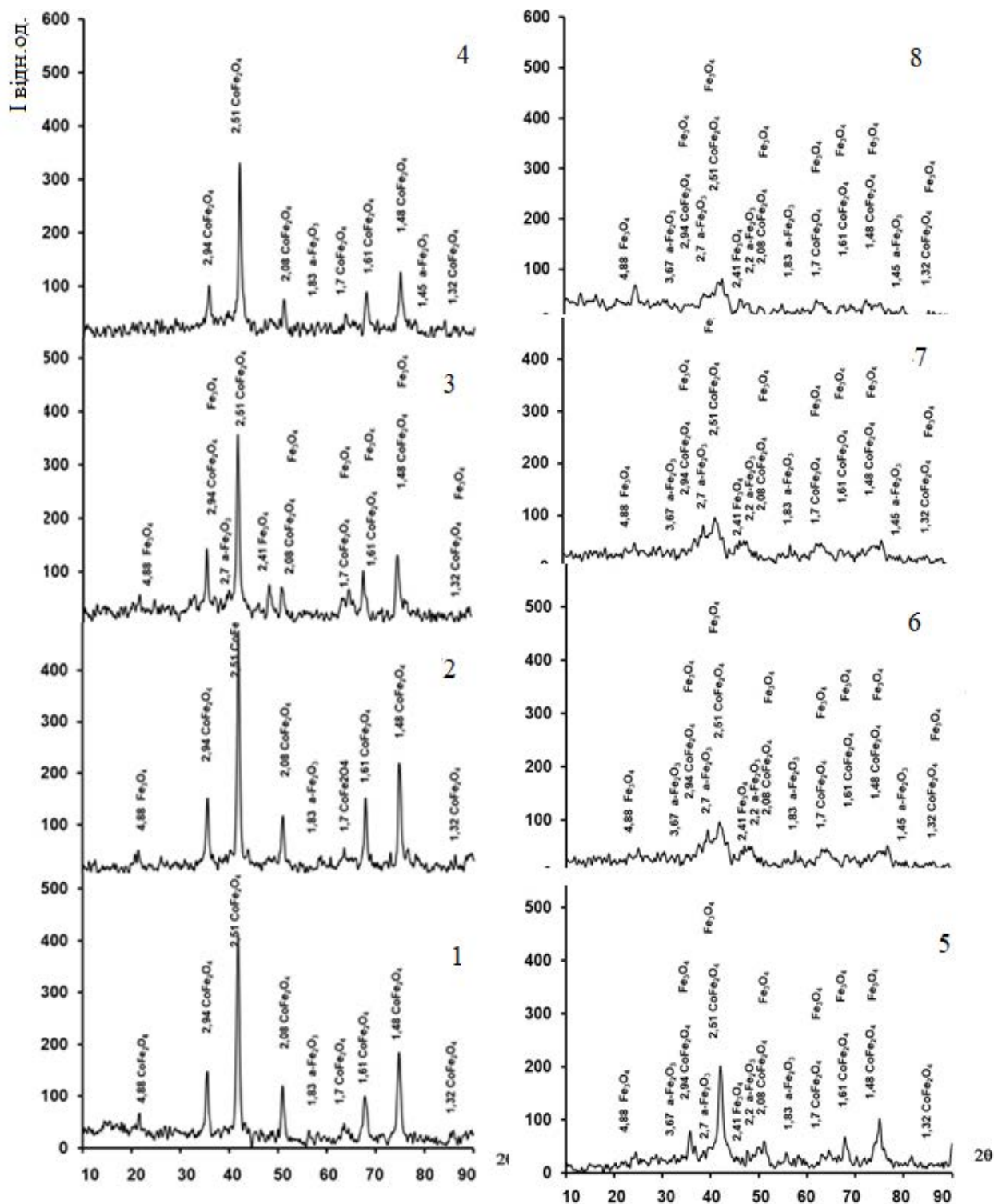


Рис. 1. Рентгенограми зразків (нумерація згідно з таблицею 1)

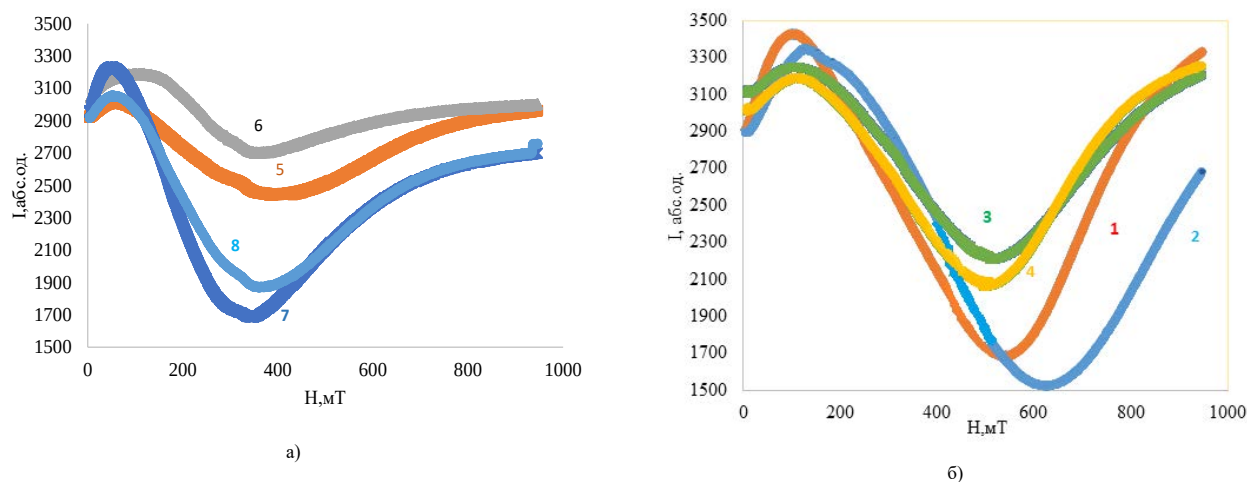


Рис. 2. ЕПР спектри зразків (нумерація згідно з таблицею 1)

Дисперсійний аналіз обраних функцій відгуку

У таблиці 2 показано результати проведення повного факторного експерименту, який використовувалася для вивчення впливу плазмового розряду, і значення функцій відгуку (інтенсивність піків на ЕПР спектрах $I_{\text{ЕПР}}$, резонансне поле з ЕПР спектру (H_r), ширина полоси поглинання ЕПР спектру (H_{pp}), тангенс кута втрат ($\text{tg}\alpha$), питоме поглинання з ЕПР спектрів (A , відн. од.) отримані для закодированих умов, прийнятих в кожному досліді та порядковий номер зразків.

Таблиця 2
Результати дослідження властивостей зразків,
отриманих під дією плазмового розряду

№	Функція відгуку				
	H_r , мТ	ΔH_{pp} , мТ	$I_{\text{ЕПР}}$, відн. од.	$\text{tg}\alpha$	A , відн. од.
1	331,5	429	1736	0,2	3,72
2	366,5	467	1843	0,2	4,30
3	320	402	1047	0,2	2,10
4	311	382	1129	0,4	2,15
5	250,5	379	565	0,4	1,07
6	229,5	285	483	0,2	0,68
7	193	268	1502	0,5	2,01
8	204,5	287	1181	0,3	1,69

На рисунку 3 наведено діаграми, що описують вплив факторів на резонансне поле. Найвпливовіший фактор у всій серії – це кислотність середовища (ефект рН сягає 112,9). Додатково значні внески часу (37,4) та взаємодій $x_2 \cdot x_3 \cdot x_1$. Резонансне поле максимальне при високому рН ($>+0.6$) і незначно зростає з підвищенням температури та тривалістю процесу. Зміна резонансного поля відповідає певному фазовому складу. Це головний важіль для точного налаштування резонансної

частоти матеріалу, і, відповідно, оптимальної частоти поглинання.

Ширина полоси поглинання також значно збільшується при високому рН і при тривалій плазмовій обробці (рис. 4). Це ознака найбільшої концентрації магнітних центрів, що корелює з рентгенофазовим аналізом. При високому рН відбувається утворення переважно висококристалічних магнітних фаз, що призводить до розширення лінії поглинання. Збільшення часу обробки діє таким же чином (рис. 4(г)).

Інтенсивність піку на ЕПР спектрі фериту значно посилюється при комбінації факторів x_2 та x_3 (високий рН та тривала обробка) (рис. 5(а-г)). Саме ці умови сприяють утворенню та стабілізації магнітних центрів. Збільшення рН також сприяє посиленню піку на ЕПР спектрі, але головний ефект впливу синергія часу та рН.

Для значень тангенсу кута втрат усі часткові ефекти надзвичайно слабкі (максимальна абсолютна величина ефекту лише 0,15). На 2D діаграмах присутні діагональні градієнти, але амплітуда коливається в межах ± 0.45 (рис. 6). Домінують слабкі взаємодії $x_1 \cdot x_3$ та головні ефекти (час та рН), проте вплив жодного фактору не перевищує 0,10–0,15. Тобто тангенс кута втрат практично не залежить від досліджуваних параметрів (температура, рН, час) у межах експериментального діапазону. Діелектричні втрати матеріалу є стабільною характеристикою і майже не контролюються умовами синтезу.

Додатково визначали коефіцієнт поглинання A (відн.од.) з ЕПР спектрів, що є найчутливішим до рН параметром і прямо відображає концентрацію неспарених електронів (рис. 7). Найвпливовішим фактором є рН (ефект ~ 1.7), з додатковим внеском взаємодії час-рН ($x_2 \cdot x_3$) та температура-

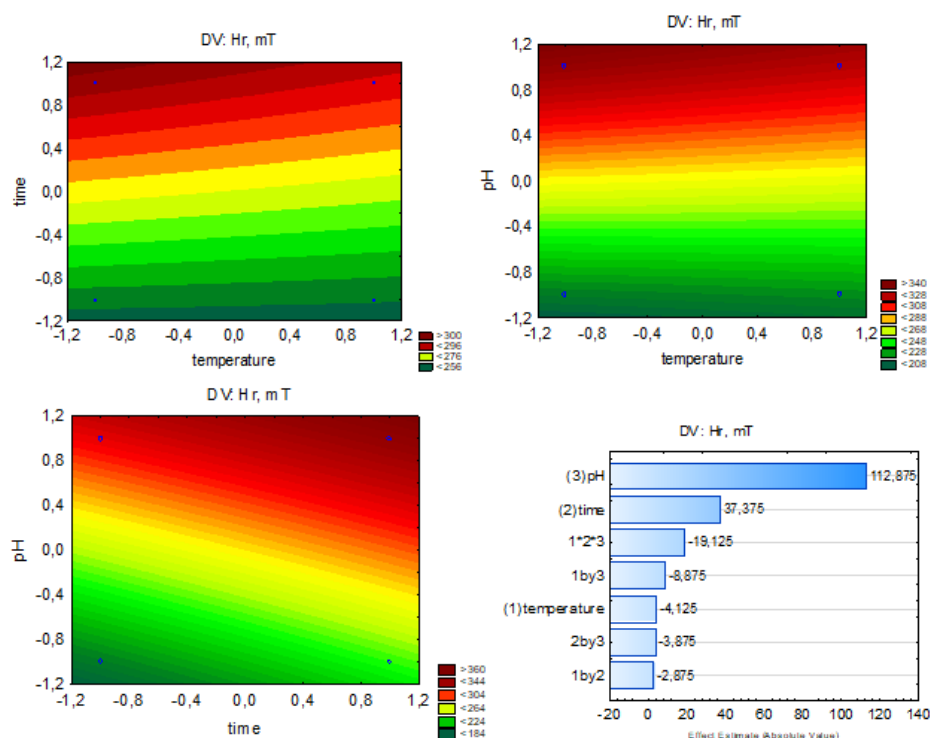


Рис. 3. 2D поверхні відгуку резонансного поля (а – $H_r = F(t, \tau)$, б – $H_r = F(pH, t)$, в – $H_r = F(pH, \tau)$, г – діаграма Парето)

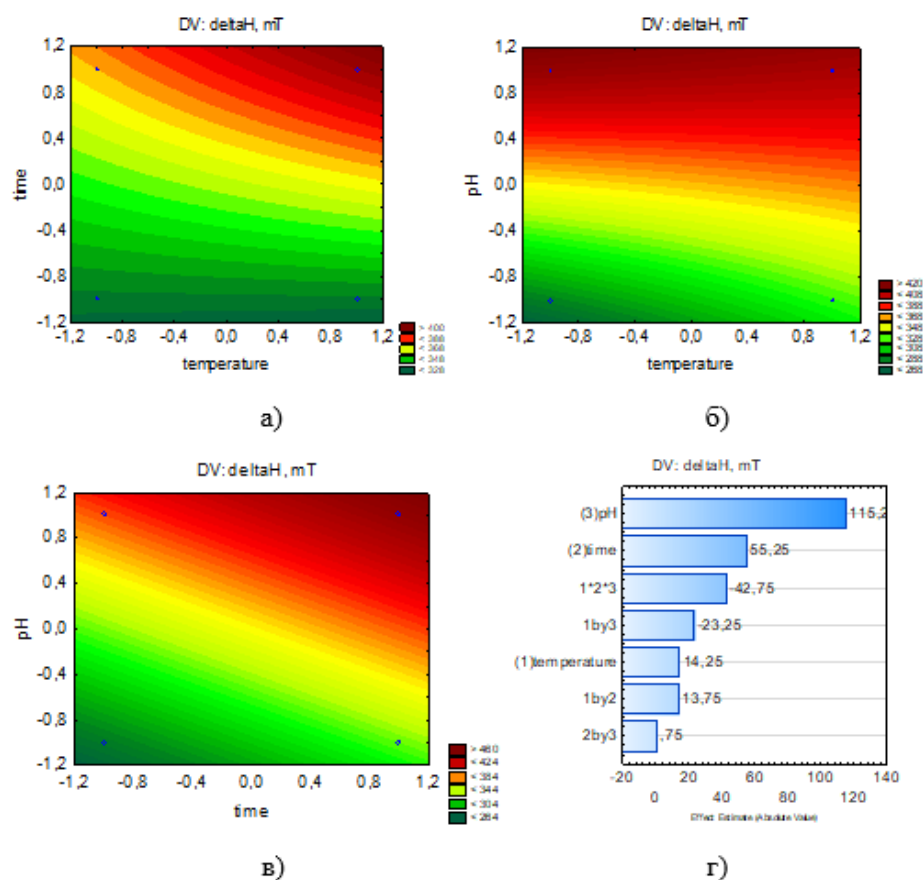


Рис. 4. 2D поверхні відгуку ширини полоси поглинання (а – $\Delta H_{pp} = F(t, \tau)$, б – $\Delta H_{pp} = F(pH, t)$, в – $\Delta H_{pp} = F(pH, \tau)$, г – діаграма Парето)

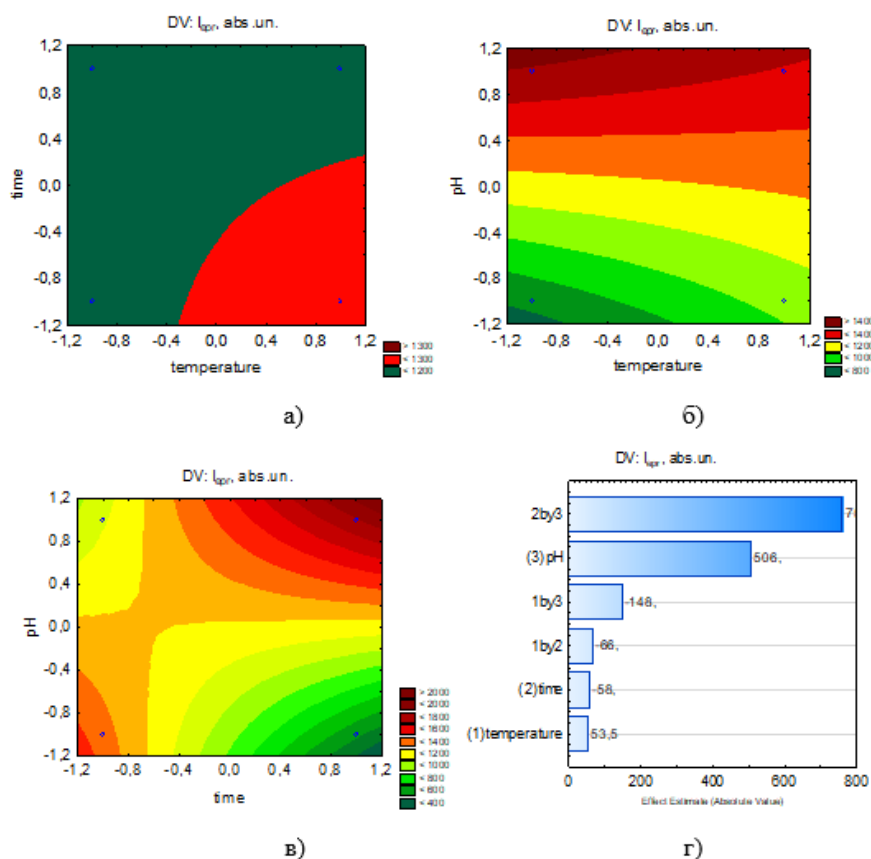


Рис. 5. 2D поверхні відгуку інтенсивності піку ЕПР спектру (а – $I_{EPR}=f(t,\tau)$, б – $I_{EPR}=f(pH,t)$, в – $I_{EPR}=f(pH,\tau)$, г – діаграма Парето)

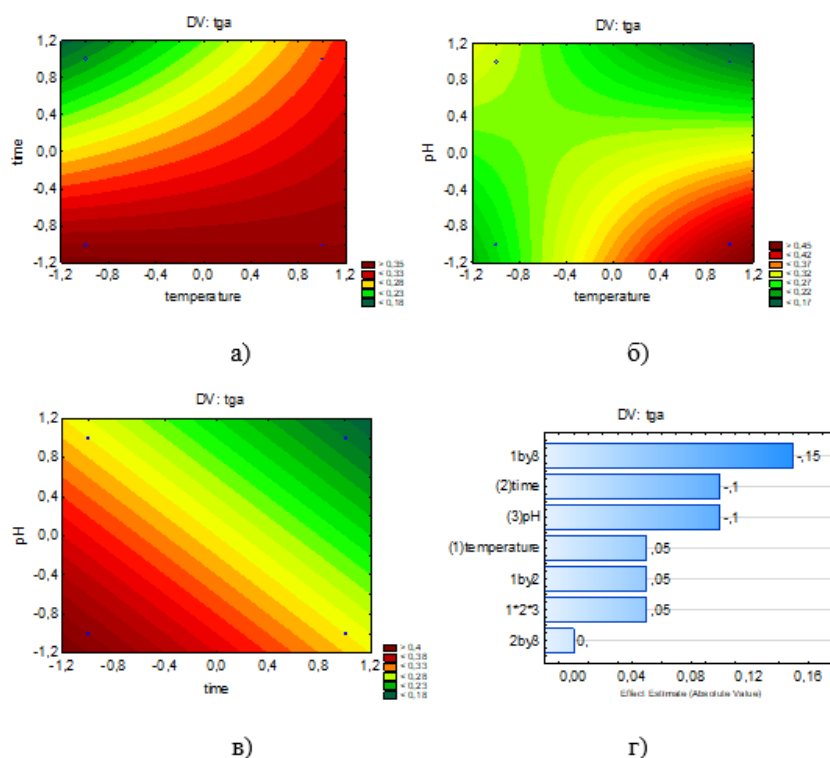


Рис. 6. 2D поверхні відгуку тангенсу куту втрат (а – $tga=f(t)$, б – $tga=f(pH,t)$, в – $tga=f(pH,\tau)$, г – діаграма Парето)

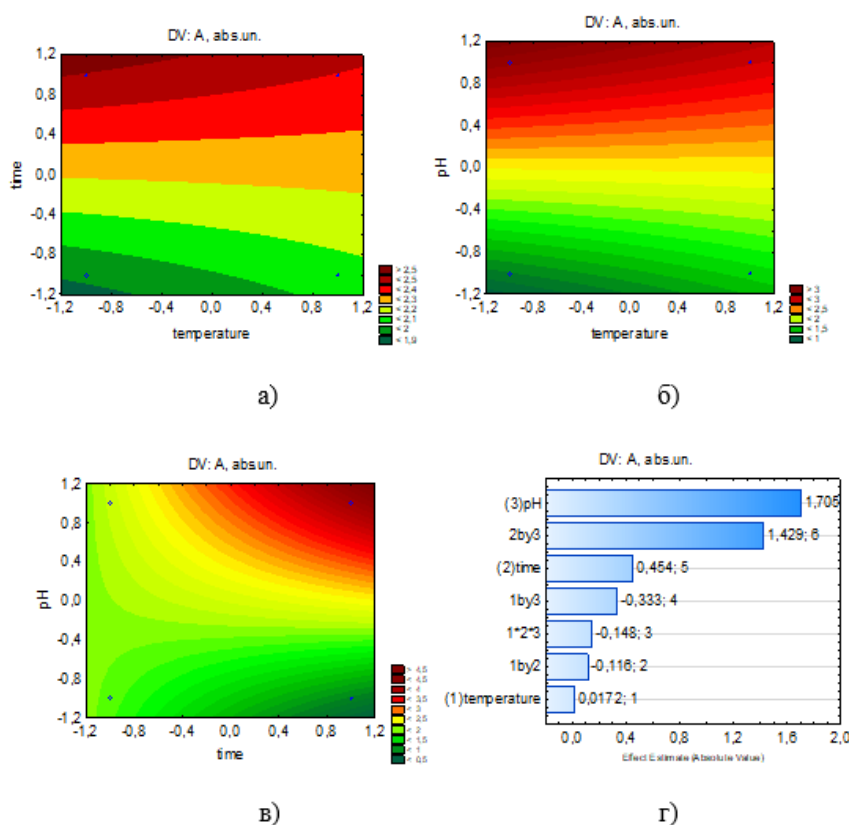


Рис. 7. 2D поверхні відгуку коефіцієнта поглинання (а – $A=f(t,\tau)$, б – $A=f(pH,t)$, в – $A=f(pH,\tau)$, г – діаграма Парето)

час ($x_2 \times x_1$). Максимальна кількість магнітних центрів формується в лужному середовищі при тривалому високотемпературному синтезі. Це ключовий важіль для керування спіновою концентрацією матеріалу.

Висновки. pH є домінуючим фактором майже для всіх функцій відгуку (інтенсивність піків ЕПР, ширина лінії ЕПР спектру, резонансне поле H_r зростають). Спостерігається синергія часу та pH

($x_2 \times x_3$). Саме ця взаємодія дає найбільше магнітних центрів (інтенсивність ЕПР спектрів збільшується на 760 умовних одиниць). Збільшення температури сприяє розширенню лінії, та сприяє формуванню сигналу ЕПР при високому pH. Максимальні значення pH, тривалості обробки, температури призводять до максимальної інтенсивності лінії ЕПР спектру та збільшення ширини лінії поглинання.

Список літератури:

1. Salih S. J., Mahmood W. M. Review on magnetic spinel ferrite (MFe_2O_4) nanoparticles: From synthesis to application. *Heliyon*. 2023. №9(6). P. 16101. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16601
2. Aherrao D. S., Singh C., Srivastava A. K. Review of ferrite-based microwave-absorbing materials: Origin, synthesis, morphological effects, dielectric/magnetic properties, composites, absorption mechanisms, and optimization. *Journal of Applied Physics*. 2022. №132(24). P.240701 <https://doi.org/10.1063/5.0123263>
3. Sharma N., Sandeep A., Madan L. Spinel and inverse spinel ferrites for microwave absorption. *Spinel and Inverse Spinel Ferrites*. Chapman and Hall/CRC, 2025. P. 32-55. <https://doi.org/10.1201/9781032665658>
4. Krishnan Y., Babu K., Sakkaraiyan S., Dinesh A., Shanmugam A., Radhakrishnan, K., Ayyar, M. Spinel cobalt ferrite nanoparticles for photocatalysts, sensor and biomedical applications: a review. *Semiconductors*. 2024. №58(9). P. 721-739. <https://doi.org/10.1134/S1063782624601808>
5. Katoch G., Jasrotia R., Prakash J., Verma A., Kandwal A., Godara S. K., Kumar G. Crystal structure, synthesis, properties and potential applications of cobalt spinel ferrite: A brief review. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.585>
6. Ismail M. M., Rafeeq S. N., Sulaiman J. M., Mandal A. Electromagnetic interference shielding and microwave absorption properties of cobalt ferrite $CoFe_2O_4$ /polyaniline composite. *Applied Physics A*. 2018. №124(5). P. 380. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-1808-x>

7. Bose S., Sumangala TP. Effect of cobalt ferrite concentration on the EMI shielding effectiveness of cobalt ferrite/graphene based epoxy composites. *Polymer Composites*. 2024. №17. DOI: 10.1002/pc.28871
8. Ghalib B., Hessien M. Magnetic and antibacterial properties of substituted cobalt spinel ferrite nanocomposites synthesized via henna green microwave hydrothermal method. *Scientific Reports*. 2025. № 15(1). P. 16653. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00851-4>
9. Kapte I. S., Niyogi S., Qureshi P. J., Khade V., Babu T. A., Madhuri W. Microwave assisted cobalt nickel ferrite as exhaust thrust sensor and EMI shield. *Ceramics International*. 2024. №50(17). P. 30754-30762. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.05.376>
10. Frolova L. A., Baskevich A. S., Butyrina T. E. Influence of plasma synthesis parameters on the magnetic, structural and photocatalytic properties of copper ferrite. *Ceramics International*. 2024. № 50(21). P. 41461-41471. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.462>

Frolova L.A., Saltykov D.Yu., Mandryka A.H, Frolov O.O. INFLUENCE OF SYNTHESIS PARAMETERS ON THE MICROWAVE CHARACTERISTICS OF COBALT FERRITE

Improvement of materials that absorb microwave radiation has been an important area of research in recent years. Cobalt ferrites and composites based on it are widely used to absorb radar signals and reduce electromagnetic interference due to their specific magnetic and dielectric properties. In the presented work, cobalt ferrite was synthesized by the plasma method. Using a full factorial experiment based on the results obtained by electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy, X-ray phase analysis, and resonance method, the influence of the pH of the reaction medium, temperature, and processing time was determined. The intensity of the peaks in the EPR spectra, the resonance field from the EPR spectrum, the width of the absorption band from the EPR spectrum, the tangent of the loss angle, the absorption coefficient from the EPR spectra were used as response functions. Statistical analysis made it possible to quantitatively assess the influence of the synthesis parameters on the selected response functions. The results showed that the acidity of the reaction medium is the parameter that most affects the phase composition and absorption properties of electromagnetic radiation of samples obtained by the plasma method. It was established that pH is the dominant factor primarily for such response functions as: the intensity of the EPR spectrum lines, the width of the absorption band, and the resonance field. A synergism of the effect of time and pH is observed. An increase in temperature contributes to the broadening of the line and the formation of an intense EPR signal, especially at high pH. The maximum values of pH, treatment duration, and temperature lead to the maximum intensity of the EPR line of the spectrum and an increase in the width of the absorption line.

Keywords: cobalt ferrite, plasma synthesis, X-ray phase analysis, EPR spectroscopy, experimental design.

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

UDC 519.87:664:66.045.1:536.46

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/32>**Kramarenko D.P.**<https://orcid.org/0000-0003-1353-686X>

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

Hirenko N.I.<https://orcid.org/0000-0001-6854-8257>

State Institution "Luhansk Taras Shevchenko National University"

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF EVAPORATION OF A LIQUID FOOD MEDIUM UNDER NON-STATIONARY CONDITIONS

The article presents the development of a mathematical model of the unsteady process of evaporation of a liquid food medium from an inert surface under conditions of natural and forced convection. The relevance of the study is due to the critical energy intensity of dehydration processes in the food industry, which account for 12% to 25% of total industrial energy consumption in developed countries, as well as the growing need for the rational utilisation of secondary raw materials, in particular brewer's spent grain (BSG) with an initial moisture content of 75–80%. The physicochemical complexity of liquid food matrices, characterised by non-Newtonian rheological behaviour, a wide range of initial moisture content (80–95%) and a tendency to case hardening, makes it impossible to apply classical convective approaches without prior mathematical justification. The developed model describes the heat balance of the «liquid-inert surface-drying agent» system as a set of interrelated thermodynamic components: convective heat transfer from the drying agent to the liquid surface and metal plate, heat conduction through the tank wall, internal heat transfer between the bottom and the liquid core, and mass transfer during the phase transition. The system of differential heat balance equations covers the entire range of the unsteady-state process – from material heating to reaching the wet thermometer temperature and complete moisture evaporation. The developed mathematical model is an adequate tool for calculating temperature profiles in a liquid and a metal plate, the kinetics of material layer height reduction and mass transfer intensity at different stages of the process. The model is applicable to a wide class of liquid food media with a high initial moisture content: brewer's grains, fruit and vegetable purees, milk concentrates, and protein suspensions. Prospects for further research include verification of the model at a laboratory installation, its extension to describe non-Newtonian systems with variable viscosity, and the development of a digital twin of the drying plant to optimise operating parameters in real time.

Keywords: mathematical model, unsteady evaporation, liquid food medium, heat and mass transfer, natural convection, forced convection, beer foam, heat transfer coefficient, mass transfer coefficient, Nusselt number, Grashof number, molecular diffusion, case hardening, dehydration, food industry.

Formulation of the problem. In the modern food industry, dehydration (drying) processes are among the most energy-intensive, complex, but critically important technological stages. According to fundamental studies of heat and mass transfer, thermodynamic processes of removing moisture from raw materials account for 12% to 25% of total industrial energy consumption in developed countries

[1]. Dehydration of liquid and highly viscous media, such as fruit and vegetable purees, juices with pulp, milk concentrates, protein isolates, extracts, suspensions and fermentation broths, is particularly challenging. These materials are characterised by extremely high initial moisture content, often ranging from 80% to 95% [2], and extremely complex rheological behaviour, most often described by non-



Newtonian models (pseudoplastic, dilatant fluids or Bingham plastics) [3].

The physicochemical nature of such systems poses serious barriers to traditional convective drying methods. Water molecules in the food matrix are in different thermodynamic states: from free moisture in macrocapillaries to physicochemically bound (hydration) moisture on the surface of protein and polysaccharide macromolecules [4]. The removal of free moisture is relatively easy, following the classical laws of evaporation from a free surface. However, as the moisture content decreases, the energy of binding of moisture to the material increases exponentially, requiring significantly higher heat input for the phase transition [5]. In addition, the low thermal conductivity of viscous products leads to uneven heating of the material volume. Rapid evaporation of moisture from the surface layers under conditions of slow internal diffusion causes the formation of a dense, impermeable crust (the so-called «case hardening» phenomenon), which effectively blocks further migration of moisture from the deeper layers. This leads to overheating of the surface, thermal degradation of the product, loss of its biological value and organoleptic properties [6]. All this leads to an urgent and urgent need to move from classical heat treatment methods to innovative dehydration technologies that can intensify mass transfer without destroying the nutritional profile of the product.

Analysis of recent research and publications.

The drying of agricultural waste represents a separate large-scale engineering challenge. Brewer's Spent Grain (BSG) is the main solid by-product of the brewing industry, accounting for about 85% of all waste in the industry. From a chemical point of view, BSG is a complex lignocellulosic matrix (barley grain hulls) containing a significant amount of hemicellulose, lignin, and up to 26% of valuable proteins and lipids [7; 25]. The initial moisture content of fresh pellets reaches 75-80%, which, combined with its rich nutritional composition, makes it an ideal environment for the rapid growth of pathogenic microflora and mould. Without dehydration, the pellet deteriorates within 24 hours, forcing breweries to dispose of it as low-margin feed or simply send it to landfill.

Successful dehydration of brewer's grains transforms this waste into a highly valuable raw material: it is used for thermal energy generation (biofuels) [8], extraction of proteins and enzymes [9], development of innovative edible bioplastic films [10], and as a functional ingredient in the baking industry. However, the complex structure of the

capillary-porous matrix of BSG, where a significant proportion of water is tightly bound, makes drying difficult.

Designing and scaling up modern drying equipment for plastic, liquid and complex products without prior mathematical modelling is an engineering anachronism. The transition from laboratory scale to industrial lines is accompanied by nonlinear changes in hydrodynamics, mass and heat transfer, as a result of which deviations in process parameters by even a few percent can cause product burning, localised overheating zones or the release of underdried products with an increased risk of microbiological spoilage.

Mathematical modelling is an indispensable tool for solving these problems in three key ways. Firstly, it minimises scaling risks by calculating the hydrodynamic and thermal similarity of the devices, which makes it possible to accurately reproduce drying profiles when the volume of the chambers is increased by hundreds of times [11]. Secondly, modern models allow for total optimisation of energy consumption by calculating heat balances in real time, designing heat recovery systems and hybrid heat pump systems, and modelling of solar automatic dryers confirms their payback in less than 2.5 years [12]. Thirdly, controlling the temperature distribution within the material allows you to track the «temperature history» of each product particle, ensuring the preservation of thermolabile compounds such as vitamins in purees or tannins in extracts [13].

Thus, the development of mathematical models of evaporation and drying processes is a scientifically justified necessity and an integral part of the modern approach to the design of food equipment. The use of such models ensures not only the technological reliability and energy efficiency of the designed devices, but also guarantees the quality and safety of the final product, which meets the requirements of current food industry standards and the principles of evidence-based engineering.

Task statement. We set the overall goal of developing an efficient process for drying a liquid food medium, which includes brewer's grains. Therefore, the purpose of the article was to develop a mathematical model of the process of evaporation of a liquid food medium under non-stationary conditions.

Outline of the main material of the study. In order to model the process of drying a liquid food medium with a mixed heat supply, we will develop a mathematical model of the unsteady process of evaporation of liquid solutions from a neutral surface under the condition of natural convection.

During the drying process, liquid solutions go through heating stages as a result of heat transfer from heated air to the material to be dried and from the heated neutral surface on which the material is located. In addition, the system evaporates moisture from the surface of the solution and transfers moisture within the material.

This article is devoted to the development of a mathematical model of the unsteady process of evaporation of liquid solutions from an inert surface under natural and forced convection. A surface made of a material that does not chemically interact with the material to be dried (stainless steel) is taken as neutral. The mathematical description is given on the example of water evaporation, the properties of which are well known [14,15].

A portion of the material (water) is poured into a rectangular metal tank, which is placed in a thermostat. The lower part of the tank is represented as a stainless steel plate (Fig. 1).

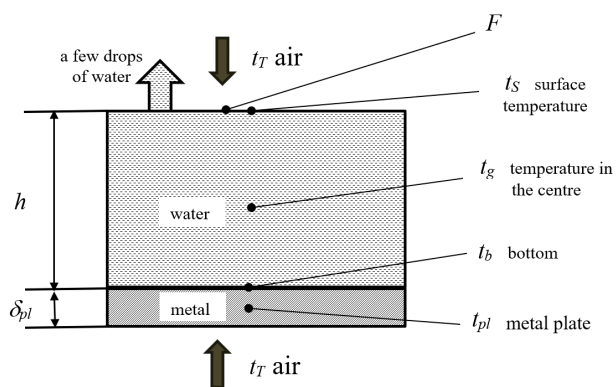


Fig 1. Scheme of heat supply

The surface of the water is in contact with air. From below, the water is bounded by a metal plate, which also exchanges heat with the air. In the process of convective drying, the water temperature rises from the initial t_0 , °C, to the wet thermometer temperature t_v , °C, at which its complete evaporation occurs. The heat transferred from air to water consists of two components: heat transferred by convection to the water surface

$$F\alpha_T(t_T - t_s)d\tau, \quad (1)$$

and the heat transferred by convection from the air to the metal plate

$$F\alpha_{pl}(t_T - t_{pl})d\tau, \quad (2)$$

where F is the heat transfer surface, m²; α_T is the heat transfer coefficient from air to the water surface, W/(m²-K); α_{pl} is the heat transfer coefficient from air to the plate (metal), W/(m²-K); t_g is the temperature of water in the core, °C; t_b is the temperature of water at the bottom of the bubble, °C; t_{pl} is the temperature of

the metal plate from the side of air, °C; t is the drying time of the material, s; h is the height of the water layer, m; $\delta_{(pl)}$ is the thickness of the plate, m.

Heat is supplied by the non-equimolar transfer of matter [16, 17].

$$G_g t_g dG, \quad (3)$$

Let us assume the temperature of the drying agent (air) in the thermostat t_T , °C, which remains constant throughout the entire process of water evaporation. Relative air humidity ϕ , %, heat and mass transfer surface F , m², surface temperature of water in contact with air t_s , °C.

In a non-stationary drying process, the supplied heat is consumed: for the evaporation of moisture from water:

$$\left[\frac{F\beta_T(p_{st} - p_p) \times r}{\frac{RT_s}{M_w}} \right] d\tau, \quad (4)$$

for heating the steel plate:

$$d(G_{pl}C_{pl}t_{pl}), \quad (5)$$

and heating the water:

$$d(G_g C_g t_g), \quad (6)$$

where $M_{(w)}$ is the molecular weight of water, kg/kmol; $p_{(st)}$ is the pressure of saturated water vapour, Pa, at the water surface temperature t_s ; p_p is the partial pressure of water vapour, Pa, in the thermostat; β_T is the mass transfer coefficient from water to air, m/s; r is the specific heat of vapour of water, J/kg, at the water surface temperature t_s ; G_{pl} is the mass of the plate, kg; C_{pl} is the specific heat capacity of the plate material, W/(kg-K); G_g is the mass of the water sample, kg; C_g is the specific heat capacity of water, W/(kg-K); R is the universal gas constant, $R = 8314$ J/(kmol-K); $T_{(s)}$ is the absolute water surface temperature, K; $dt_{(g)}$ is the increase in water temperature over time $d\tau$; dt_{pl} is the increase in plate temperature over time $d\tau$.

Taking into account expressions (1) – (6), the heat balance equation will be as follows:

$$F\alpha_T(t_T - t_s)d\tau + F\alpha_{pl}(t_T - t_{pl})d\tau + C_g t_g dG = \frac{F\beta_T(p_{st} - p_p) \times r}{\frac{RT_s}{M_w}} d\tau + d(G_g C_g t_g) + d(G_{pl} C_{pl} t_{pl}), \quad (7)$$

After opening the brackets, considering C_g and $C_{(pl)}$ to be constant, we obtain:

$$F\alpha_T(t_T - t_s)d\tau + F\alpha_{pl}(t_T - t_{pl})d\tau = \frac{F\beta_T(p_{st} - p_p) \times r}{\frac{RT_s}{M_w}} d\tau + C_g t_g dt_g + G_{pl} C_{pl} dt_{pl}, \quad (8)$$

In the process of evaporation during the time $d\tau$, the mass of water changes by the value dG , kg:

$$dG = - \left[\frac{F\beta_T(p_{st} - p_p)}{\frac{RT_s}{M_w}} \right] d\tau, \quad (9)$$

During the time $\tau + d\tau$ the mass of water will be equal to $G_{\tau+d\tau}$:

$$G_{\tau+d\tau} = G_{\tau} + dG, \quad (10)$$

and the thickness of the water layer (height) will be equal to $h_{\tau+d\tau}$:

$$h_{\tau+d\tau} = h_{\tau} + dh, \quad (11)$$

where G_{τ} , h_{τ} are the mass and thickness of the water layer at time τ , kg; dh is the change in the thickness of the water layer, m.

The term $\alpha_{pl}(t_r - t_{pl})$ in equation (8) describes the amount of heat transferred from air to glass by convection. Part of this heat is used to heat the glass, while the other part is transferred through the glass to the water and is used to heat the water and evaporate it. Heat loss to evaporation of water will occur when the temperature of the water in the core t_g becomes higher than the temperature of the water surface t_s .

Let us consider natural convection. To calculate the coefficient convective heat transfer coefficient α_T for media with $Pr \geq 0.5$, the following formula is recommended when considering convection in an unlimited volume [18,19]:

$$Nu_T = k(Pr \times Gr)^n, \quad (12)$$

where Nu_T is the Nusselt thermal criterion; Pr is the Prandtl criterion; Gr is the Grasthoff criterion; k , n are coefficients depending on the product $Pr \times Gr$.

$$Nu_T = \frac{\alpha_T l}{\lambda}, \quad (13)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (14)$$

$$Gr = \frac{gl^3\beta(t_r - t_s)}{\nu^2}, \quad (15)$$

where g is the acceleration of free fall $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; l is the defining linear dimension (characteristic length), m; β is the temperature coefficient of volume expansion of air, K^{-1} ; ν is the kinematic viscosity of air, m^2/s ; a is the thermal conductivity coefficient, m^2/s ; λ is the specific thermal conductivity of air, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

The recommended values of k and n in formula (12) are given in Table 1.

It is recommended to increase the value of k for a plate with the heating side facing upwards by 30

%, and to decrease it for a plate with the heating side facing downwards by 30 % compared to the value of k given in Table 1 [18,19].

Table 1
Estimated values of k and n in formula (12)

$Pr \times Gr$	k	n
$< 10^{-3}$	0,45	0
$10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$> 2 \cdot 10^7$	0,14	1/3

The mass transfer coefficient β_T , m/s , by analogy with heat transfer, is determined from the Nusselt diffusion criterion Nu_D :

$$Nu_D = \frac{\beta_T l}{D}, \quad (16)$$

where D is the molecular diffusion coefficient, m^2/s .

To determine the value of D for the water-air system, we use the formula [20,21]:

$$D = D_0 \left(\frac{T_{abs}}{237} \right)^{1,8} \times \frac{101,3}{p_{bar}}, \quad (17)$$

where T_{abs} is the absolute temperature of the mixture of water vapour and air, K ; p_{bar} is the barometric pressure, kPa , at which the process of moisture evaporation occurs.

The diffusion coefficient D_0 at $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ and barometric pressure $p_{bar} = 101.3 \text{ kPa}$ for the air-water vapour mixture is $D_0 = 0.0784 \text{ m}^2/\text{h}$ or $D_{(0)} = 2.178 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ [20,21].

The value of α_{pl} for the case of heat transfer from air to a solid horizontal surface with a constant wall temperature, which can be considered the temperature of the metal plate on the air side t_{pl} during the period of constant drying rate, is determined by expression [22]:

$$Nu = 0.667(Ra\psi(Pr))^{1/5}, \quad (18)$$

where Ra is the Rayleigh criterion, $Ra = Gr \times Pr$; $\psi(Pr)$ is a function of the Prandtl criterion.

$$\psi(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}, \quad (19)$$

Equation (19) is recommended for all cases of natural convection in boundary layers [22].

A characteristic geometric dimension in the criterion equations (12) and (18) is the ratio of the area of the heat and mass transfer surface (water surface) to its perimeter:

$$l = \frac{S}{P}, \quad (20)$$

where S is the surface area, m^2 , and P is the perimeter, m .

To determine the surface temperature at which water evaporates, we write the balance equation:

$$F\alpha_T(t_T - t_s)d\tau + F\alpha_{g,2}(t_g - t_s)d\tau = \frac{F\beta_T(p_{st} - p_p) \cdot r}{RT_s} d\tau, \quad (21)$$

where $\alpha_{g,2}$ is the heat transfer coefficient between the surface and the core of water (Fig. 2).

The direction of heat flow in equation (21) will be determined by the driving

heat transfer force $t_g - t_s$. In the case of $t_g < t_s$, the heat flux will be negative, i.e., the supplied heat will be spent on heating the water and its evaporation.

From equation (21) we obtain:

$$t_s = \frac{\alpha_T t_T + \alpha_{g,2} t_g - [\beta_T(p_{st} - p_p) \cdot r] \cdot M_w / RT_s}{\alpha_T + \alpha_{g,2}}, \quad (22)$$

It is known [23] that the temperature difference between the surface of a body and the surrounding fluid leads to a density gradient that causes the fluid to move.

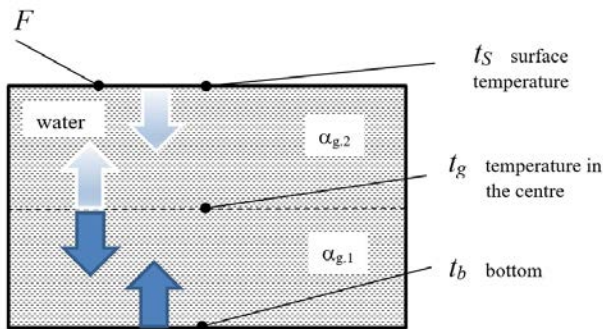


Fig. 2. Scheme of heat transfer between the surface and the core

The intensity of heat transfer between the body and the fluid increases compared to pure heat conduction. This movement of the fluid associated with the transfer of heat leads to free convection. In our case, the body is a metal plate to which heat is supplied from the air, and the surrounding fluid is water.

To determine the temperatures of t_b and t_{pl} , write down the heat balance (Fig. 2). The direction of heat flows will be determined by the corresponding temperature difference ($t_s - t_g$) and ($t_b - t_g$).

$$\alpha_{g,1}(t_b - t_g)Fd\tau = GC_g dt_{g,1}, \quad (23)$$

$$\alpha_{g,2}(t_s - t_g)Fd\tau = GC_g dt_{g,2}, \quad (24)$$

The left side of equations (23) and (24) describes the heat transfer from the boundary (bottom, surface) to the water core. The right-hand side shows the amount of heating or cooling of the liquid depending on the direction of heat flow. Adding the left and right

sides of equations (23) and (24), we obtain

$$\alpha_{g,1}(t_b - t_g)Fd\tau + \alpha_{g,2}(t_s - t_g)Fd\tau = GC_g(dt_{g,1} + dt_{g,2}) = GC_g dt_g, \quad (25)$$

From equation (25), we determine: t_b

$$t_b = \frac{GC_g dt_g - \alpha_{g,2}(t_s - t_g)Fd\tau + \alpha_{g,1} t_g Fd\tau}{\alpha_{g,1} Fd\tau}, \quad (26)$$

The heat that has passed through the metal plate due to thermal conductivity is equal to the heat removed from the plate to the water due to heat transfer:

$$\frac{\lambda_{pl}}{\delta_{pl}}(t_{pl} - t_b) = \alpha_{g,1}(t_b - t_g), \quad (27)$$

From equation (27), we find the temperature of the metal plate on the air side: t_{pl}

$$t_{pl} = t_b + \alpha_{g,1}(t_b - t_g) \frac{\delta_{pl}}{\lambda_{pl}}, \quad (28)$$

The calculation formulas for determining the heat transfer coefficients for free convection in the liquid $\alpha_{g,1}$ and $\alpha_{g,2}$ are as follows [24]:

at $10^{-3} < Pr \times Gr < 500$

$$\alpha = A_1 \left(\frac{t}{l^5} \right)^{1/8}, \quad (29)$$

at $500 < Pr \times Gr < 2000000$

$$\alpha = A_2 \left(\frac{t}{l} \right)^{1/4}, \quad (30)$$

at $Pr \times Gr > 2000000$

$$\alpha = A_3 \left(\frac{t}{l} \right)^{1/3}, \quad (31)$$

The values of the coefficients A for water are given in Table 2 [24].

Table 2
Values of the coefficients A_1, A_2, A_3 in formulas (29)-(31)

°C	0	20	40	60	80	100	150	200
A_1	8,0	11,3	13,5	15,1	16,3	17,2	18,7	19,4
A_2	60	96	128	153	176	195	235	262
A_3	88	170	250	312	366	414	522	614

In formulas (29)-(31), we take half the thickness of the water layer $h/2$ as the defining linear dimension.

The above system of equations is a mathematical description of the unsteady evaporation of liquid solutions.

Conclusions. A mathematical model of the unsteady evaporation of a liquid food medium from an inert surface under conditions of natural and forced convection has been developed. The model describes the heat balance of the system as a set of interconnected components: convective heat transfer

from the drying agent to the surface of the liquid and the metal plate, heat conduction through the tank wall and internal heat transfer between the bottom and the core of the liquid. The proposed system of equations covers all stages of the unsteady-state process, from heating the material to reaching the wet bulb temperature and complete moisture evaporation.

To determine the convective heat transfer coefficients, the criterion equations with the Nusselt, Grashof, and Prandtl criteria adapted to the geometry of the system under study were used. The mass transfer coefficient is calculated on the basis of the analogy between heat and mass transfer using the Nusselt diffusion criterion.

The coefficient of molecular diffusion in the water-air system is determined by temperature and barometric dependencies with the reference value $D_0 = 2.178 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ at 0°C and a pressure of 101.3 kPa.

The resulting model is an adequate mathematical tool for calculating temperature profiles in the liquid and the plate, the kinetics of the material layer height reduction and the mass transfer rate at different stages of evaporation. The model is applicable to

liquid food media with a significant initial moisture content, including brewer's grains with a moisture content of 75-80%, fruit and vegetable purees, milk concentrates, and protein suspensions.

A promising direction is the verification of the developed mathematical model by comparing the calculated data with the results of a physical experiment in a laboratory installation with controlled parameters of the drying agent. It is important to extend the model to describe the behaviour of non-Newtonian liquids – pseudoplastic and dilute systems – taking into account the variable viscosity during the concentration process. An important task is to study the phenomenon of «case hardening» and develop a criterion for its occurrence based on the obtained temperature profiles. Further study is required to validate the model on specific food matrices, such as brewer's grains, fruit purees and protein isolates, with the determination of correction factors for each product class. It is also promising to develop a digital twin of the drying plant based on the proposed model for real-time optimisation of operating parameters and design of heat recovery systems.

Bibliography:

1. Ballesteros Martínez M. A., Roy P., Solano Alarcón J. N., Gaukel V. Spray drying of highly viscous feeds: Modeling the internal flow of an ACLR atomizer for non-Newtonian liquid feeds with high dry-matter contents. *Drying Technology*. 2025. Vol. 43. Pp. 1824–1832. <https://doi.org/10.1080/07373937.2025.2534037>
2. Nowak D., Jakubczyk E. The Freeze-Drying of Foods—The Characteristic of the Process Course and the Effect of Its Parameters on the Physical Properties of Food Materials. *Foods*. 2020. Vol. 9, No. 10. Article 1488. <https://doi.org/10.3390/foods9101488>
3. Ballesteros Martínez M. A., Roy P., Solano Alarcón J. N., Gaukel V. Spray drying of highly viscous feeds: Modeling the internal flow of an ACLR atomizer for non-Newtonian liquid feeds with high dry-matter contents. *Drying Technology*. 2025. Vol. 43. Pp. 1824–1832. <https://doi.org/10.1080/07373937.2025.2534037>
4. Petrova Zh. O., Paziuk V. M., Novikova Y. P., Petrov A. I. Kinetics of the Drying Process of Composite Biopellets on a Convective Drying Bench. *Проблеми машиностроєння*. 2025. Vol. 28. №. 3. Pp. 23–33. <https://doi.org/10.15407/pmach2025.03.023>
5. Burdo O. G., Terziev S. G., Burdo A. K., Sirotuk I. V., Pilipenko E. A., Akimov A. V., Molchanov M. Yu. Energetics and Kinetics of Plant Raw Material Dehydration Processes. *Problems of the Regional Energetics*. 2022. No. 3 (55). Pp. 111–129. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55>
6. Gulati T., Datta A. K. Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. *Journal of Food Engineering*. 2015. Vol. 166. Pp. 119–138. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031>
7. Silva B. F., Machado L., Fernandes A. M., Pereira R. N., Belo I. Effect of Ohmic Heating Pretreatment on Enzyme Production by Solid-State Fermentation of Brewer's Spent Grain. *Fermentation*. 2025. Vol. 11, No. 8. Article 421. <https://doi.org/10.3390/fermentation11080421>
8. Arranz J. I., Miranda M. T., Sepúlveda F. J., Montero I., Rojas C. V. Analysis of Drying of Brewers' Spent Grain. *Proceedings*. 2018. Vol. 2, No. 23. Article 1467. <https://doi.org/10.3390/proceedings2231467>
9. Gouseti O., Larsen M. E., Amin A., Bakalis S., Petersen I. L., Lametsch R., Jensen P. E. Applications of Enzyme Technology to Enhance Transition to Plant Proteins: A Review. *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 13. Article 2518. <https://doi.org/10.3390/foods12132518>
10. Gomez-Delgado E., Medina Jaramillo C., Lopez-Cordoba A. Analysis of drying kinetic of brewer's spent grains: effect of the temperature on the physical properties and the content of bioactive compounds. *Vitae. Revista de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias*. 2023. Vol. 30, No. 2. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v30n2a351025>
11. Aigner I., Zettl M., Schroettner H., van der Wel P., Khinast J. G., Krumme M. Industrial-Scale Continuous Vacuum Drying of Active Pharmaceutical Ingredient Paste: Determination of the Process Window. *Organic Process Research & Development*. 2022. Vol. 26, No. 2. Pp. 323–334. <https://doi.org/10.1021/acs.oprd.1c00393>
12. Metwally K. A., Oraiath A. A. T., Elzein I. M., El-Messery T. M., Nyambe C., Mahmoud M. M., Abdeen M. A., Telba A. A., Khaled U., Beroual A., Elwakeel A. E. The Mathematical Modeling, Diffusivity, Energy, and Enviro-Economic Analysis (MD3E) of an Automatic Solar Dryer for Drying Date Fruits. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 8. Article 3506. <https://doi.org/10.3390/su16083506>
13. Topuz F. C., Pazir F. Characterization, Optimization, Physicochemical Properties, and Bioactive Components of Drum-Dried Apple Puree. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2019. Vol. 22. Pp. 109–119. URL: <https://www.researchgate.net/publication/352880953>
14. Kazemi M. A., Zandavi S. H., Zargartalebi M., Sinton D., Elliott J. A. W. Analysis of the evaporation coefficients of water, heavy water, and methanol in a high vacuum environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023. Vol. 204. Article 123833. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123833>

15. Houle F. A., Miles R. E. H., Pollak C. J., Reid J. P. A purely kinetic description of the evaporation of water droplets. *Journal of Chemical Physics*. 2021. Vol. 154, No. 5. Article 054501. <https://doi.org/10.1063/5.0037967>
16. Vlasov V. A. Diffusion-kinetic model of liquid evaporation from a Stefan tube: A solution to the Stefan diffusion problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 163. Article 120379. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2020.120379>
17. Huang C.-H. et al. Experimental study on the heat and mass transfer of a falling film absorber/evaporator with aqueous salt solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020–2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931020333159>
18. Fan Y., Zhao Y., Torres J. F., Xu F., Lei C., Li Y., Carmeliet J. Natural convection over vertical and horizontal heated flat surfaces: A review of recent progress focusing on underpinnings and implications for heat transfer and environmental applications. *Physics of Fluids*. 2021. Vol. 33, No. 10. Article 101301. <https://doi.org/10.1063/5.0065125>
19. Zhen Q., Tana, Sun Y., Yan C., Wang H. Nu–Gr correlation for laminar natural convection heat transfer from a sphere submitted to a constant heat flux surface. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 16565. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67382-2>
20. Burgess Jr. D. Self-Diffusion and Binary-Diffusion Coefficients in Gases. *Technical Note (NIST TN)*. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD. 2024. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2279>
21. Astrath N. G. C., Shen J., Song D., Rohling J. H., Astrath F. B. G., Zhou J., Navessin T., Liu Z. S., Gu C. E., Zhao X. The Effect of Relative Humidity on Binary Gas Diffusion. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2009. Vol. 113, No. 24. Pp. 8369–8374. <https://doi.org/10.1021/jp900796w>
22. Bachiri M., Bouabdallah A. Natural Convection Study by the Direct Integration of the Momentum and Energy Equations. *International Journal of Heat and Technology*. 2016. Vol. 34, No. 2. Pp. 181–185. <https://doi.org/10.18280/ijht.34.0204>
23. Pattanayak S. K. et al. Natural convection heat transfer from upward-facing plates in saline water. *Heat Transfer*. 2023. <https://doi.org/10.1002/hjt.22857>
24. Huang F., Lu Y., Huang Y. Natural convection on a vertical plate with variable heat flux in supercritical fluids. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2020. Vol. 165. Article 104936. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104936>
25. Крамаренко Д. П., Дуб В. В. Використання альтернативної сировини у виробництві пива. *Стан і перспективи розвитку хімічної, харчової та парфумерно-косметичної галузей промисловості : матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Херсон, 31 травня 2023 р.)*. Херсон, 2023. С. 35–37.

Крамаренко Д.П., Гіренко Н.І. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ВИПАРОВУВАННЯ РІДКОГО ХАРЧОВОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ

У статті представлено розробку математичної моделі нестационарного процесу випаровування рідкого харчового середовища з інертної поверхні за умов природної та вимушеної конвекції. Актуальність дослідження зумовлена критичною енергоємністю процесів зневоднення у харчовій промисловості, на частку яких припадає від 12% до 25% загального промислового енергоспоживання в розвинених країнах, а також зростаючою потребою в раціональній утилізації вторинної сировини – зокрема пивної дробини (Brewer's Spent Grain, BSG) з початковим вологовмістом 75–80%. Фізико-хімічна складність рідких харчових матриць, що характеризуються неньютонівською реологічною поведінкою, широким діапазоном початкової вологості (80–95%) та схильністю до явища «case hardening», унеможливає застосування класичних конвективних підходів без попереднього математичного обґрунтування. Розроблена модель описує тепловий баланс системи «рідина–інертна поверхня–сушильний агент» як сукупність взаємозв'язаних термодинамічних складових: конвективного теплопідводу від сушильного агенту до поверхні рідини та металевої пластини, теплопровідності через стінку резервуару, внутрішньої тепловіддачі між дном і ядром рідини, а також масоперенесення при фазовому переході. Система диференціальних рівнянь теплового балансу охоплює весь діапазон нестационарного процесу – від прогрівання матеріалу до досягнення температури мокрого термометра та повного випаровування вологи. Розроблена математична модель є адекватним інструментом для розрахунку температурних профілів у рідині та металевій пластині, кінетики зменшення висоти шару матеріалу та інтенсивності масовіддачі на різних етапах процесу. Модель придатна для застосування до широкого класу рідких харчових середовищ із значним початковим вологовмістом: пивної дробини, фруктових і овочевих пюре, молочних концентратів та білкових суспензій. Перспективами подальших досліджень є верифікація моделі на лабораторній установці, її розширення для опису неньютонівських систем зі змінною в'язкістю, а також розробка цифрового двійника сушильної установки для оптимізації режимних параметрів у реальному часі.

Ключові слова: математична модель, нестационарне випаровування, рідке харчове середовище, тепломасообмін, природна конвекція, вимушена конвекція, пивна дробина, коефіцієнт тепловіддачі, коефіцієнт масовіддачі, критерій Нуссельта, критерій Грасгофа, молекулярна дифузія, «case hardening», зневоднення, харчова промисловість.

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

ТРАНСПОРТ

УДК 656.073.72

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/33>

Вільшанюк М.С.

<http://orcid.org/0000-0001-5396-6691>

Одеський національний морський університет

ЛОГІСТИЧНІ АСПЕКТИ ЕКСПОРТУ ЗЕРНА: ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ДОСТАВКИ

У статті була піднята тема комерційного транспортування зерна. Ця тема була обрана не випадково: виробництво і подальший експорт зерна є досить важливою і суттєвою економічною віхою в нашій країні, і хоча, розвинені країни зараз вступають в цифрову еру, Україна була і залишається аграрною країною – 40% (у грошовому еквіваленті) від загального обсягу товарів, що поставляються на експорт, складає аграрна продукція. На сьогоднішній день, Україна посідає провідну позицію серед найбільших експортерів зерна у світі. І в той момент, коли в геометричній прогресії збільшується кількість населення планети, контроль і вплив на ринку продуктів харчування є колосальним економічним та політичним важелем нашої країни.

З розвитком міжнародної торгівлі, природні землеробські переваги трансформувалися в економічну спеціалізацію країн на світовому ринку в якості виробників, експортерів та споживачів різних зернових культур.

Сьогодні, практично половину світового виробництва зернових забезпечують країни, що розвиваються, Азіатсько-Тихоокеанського регіону (АТР), головним чином, Китай, Індія та Індонезія. І хоча, Китай та Індія є світовими лідерами по валовому збору пшениці, вони практично повністю використовують вироблені обсяги злаку для внутрішнього споживання. Провідними експортерами при цьому є США і Канада. Зростання обсягів виробництва зерна та, як наслідок, експорту, може значно поліпшити позиції України на світовій арені. Така позитивна тенденція, безсумнівно, поліпшить економічні показники країни, адже значна частина експортної виручки є заслугою аграрного комплексу.

Розуміючи актуальність вищезазначеної теми, в роботі було важливо поставити наступну мету: поліпшення функціонування процесів транспортування вітчизняного зерна з комерційної точки зору. Україна, хоча, і залишається аграрною країною, однак технічна оснащеність наших фермерських господарств не відстає від рівня провідних країн – досить велика маса грошей інвестується як резидентами, так і нерезидентами країни, для того, щоб якомога більше тон зерна зібрати з одного гектара землі.

В роботі розглядався процес транспортування зерна пшениці, що враховує українську наземну та морську складову доставки вантажу, і на основі отриманих результатів було обрано кращий спосіб доставки вантажу з точки зору економічної вигідності для експедиторської компанії, найнятої продавцем партії пшениці.

Ключові слова: зерно, транспортування, контейнер, морське судно, експорт, експедитор.

Постановка проблеми. Зерно є одним з основних видів продукції, що експортується. При доставці цього вантажу виникають питання стосовно способу транспортування зерна: насипом чи в контейнерах. В світовій і в українській логістиці спостерігається за останні десятиліття великий бум контейнеризації – все більше і більше товарів доставляються в нашу країну за допомогою контейнерних перевезень, і як у всьому світі,

так і у нас, є проблема з вихідними потоками контейнерів.

У світовій практиці дана проблема вирішується тим, що все більше насипних вантажів починають перевозити в контейнерах – від металобрухту до піску. У нашому ж випадку Україна може запропонувати світові заповнення зворотних вантажопотоків зерном.

Виникає необхідність скоротити витрати на логістику при експорті зерна та розглянути мож-



ливість раціональних способів транспортування цього вантажу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом питання транспортування експортного зерна доволі часто піднімаються в різних дослідженнях.

Так, в рамках вивчення ефективності логістичних схем від місць виробництва до пунктів перевалки, зокрема до морських портів, в роботі Вернигори Р. В., Огорокова А. М., Тітяпова В. І., Латаша С. О. [1] були розглянуті логістичні схеми доставки зерна до основного перевізника. В статті Ломотько Д. В., Ільчишина В. М., Афанасов Г. М., Афанасової О. Ф. [2] вирішувались проблеми стосовно нерівномірного розподілу елеваторних потужностей та було встановлено необхідність розвитку інфраструктури з використанням контейнерів при перевезенні зерна.

В дослідженні Шпак Н.Г., Павловської Л.А., Коробкової О.М. [3] піднімалося питання стосовно особливостей митно-транспортних операцій при експорті зерна з України.

Вплив основних проблем логістичних маршрутів з експорту зерна з України на стабільність світових зернових ринків вивчався в статті Ковальського Ю.В. [4]. Дослідження логістичних витрат при експорті зерна автомобільним та залізничним транспортом в умовах воєнного стану проводилося в статті Германюк Ю. М., Паленик І. О. [5]. Тому можна відмітити, що транспортування зерна є актуальним і представляє інтерес в даному випадку у контексті раціоналізації способів перевезення та транспортно-експедиторського супроводження до країни призначення.

Постановка завдання. Метою статті є розв'язання наступних завдань: визначення ефективності перевезення зерна в контейнерах в сьогоdnішніх умовах, аналіз стану інфраструктурних об'єктів, що задіяні у логістиці зернових вантажів.

Виклад основного матеріалу. Україна навіть в умовах воєнного стану займає провідну позицію серед світових експортерів зернових, а саме 3-4 місце з експорту кукурудзи та приблизно 6-7 місце з експорту пшениці. Основним товаром, що експортує Україна, є продукція агропромислового комплексу, залізна руда, чорні метали і на третьому місці продукція переробки – олія, шпроти, кондитерські вироби. Тобто потрібно розуміти, що не дивлячись на усі складнощі, Україна може конкурувати з багатьма країнами світу в поставках зерна. Така конкурентоспроможність обумовлена остаточною ціною пропозиції на зовніш-

ньому ринку, на формування якої, крім валюти, впливає безліч факторів, у тому числі собівартість виробництва (яка в Україні нижче, ніж в Європі, що дозволяє здійснювати закупівлі за нижчими цінами), а також витрати на логістику. І в силу географічного розташування у України є перевага при організації поставок в напрямку Європейського Союзу, Близького Сходу, Східної Африки і Південно-Східної Азії. В цілому Україна вже давно визначилася зі своїми пріоритетними ринками, тому на даному етапі основним завданням є їх утримання і освоєння нових.

Фактично сумарна продуктивність таких інфраструктурних об'єктів, як елеваторні та перевалочні потужності, близька до стандартної потреби в даний час. Завдяки цьому можна стверджувати, що в Україні розвинена інфраструктура для експорту зерна в початкових і фінальних точках, зв'язок між ними можна представити схематично (рис. 1).

Зараз перевезення зерна по Україні здійснюється 2 способами – залізничним і автотранспортом. Їх вибір залежить від відстані і кінцевої точки транспортування (від елеватора вантажовласника до термінального елеватора).

Що стосується залізниці, то на сьогодні це ключовий вид транспорту при доставці зерна в морські та річкові порти для експорту.

Все більше набуває поширення практика завантаження зерна в залізничні платформи контейнерним способом. Тобто транспортування зернових культур в спеціальних, найчастіше, 20-тонних контейнерах. Перевезення зерна в контейнерах закордонним покупцям гарантує якість, забезпечує зручність в поводженні з ним і дозволяє чітко відокремлювати різні партії продукції.

Одночасно на ринку спостерігається активне нарощування кількості спеціалізованого автопарку для перевезення зерна. Потік автотранспорту залишається стабільним і відіграє роль альтернативи залізничному транспорту в якості допоміжного перевізника перевезення великих партій зерна [6].

Для доставки вантажу в країну призначення вантажовласник наймає експедитора, щоб бути впевненим, що його вантаж доїде в потрібний час до порту за певний час, і що вантаж не загубиться. А якщо і загубиться, то експедитор це негайно компенсує зі своїх коштів.

Експедитор супроводжує вантаж на всій ділянці перевезення – від продавця до кінцевого покупця. Чим досвідченіший експедитор, тим дешевше виходять логістичні витрати для замовника, навіть з урахуванням оплати праці експедитора.

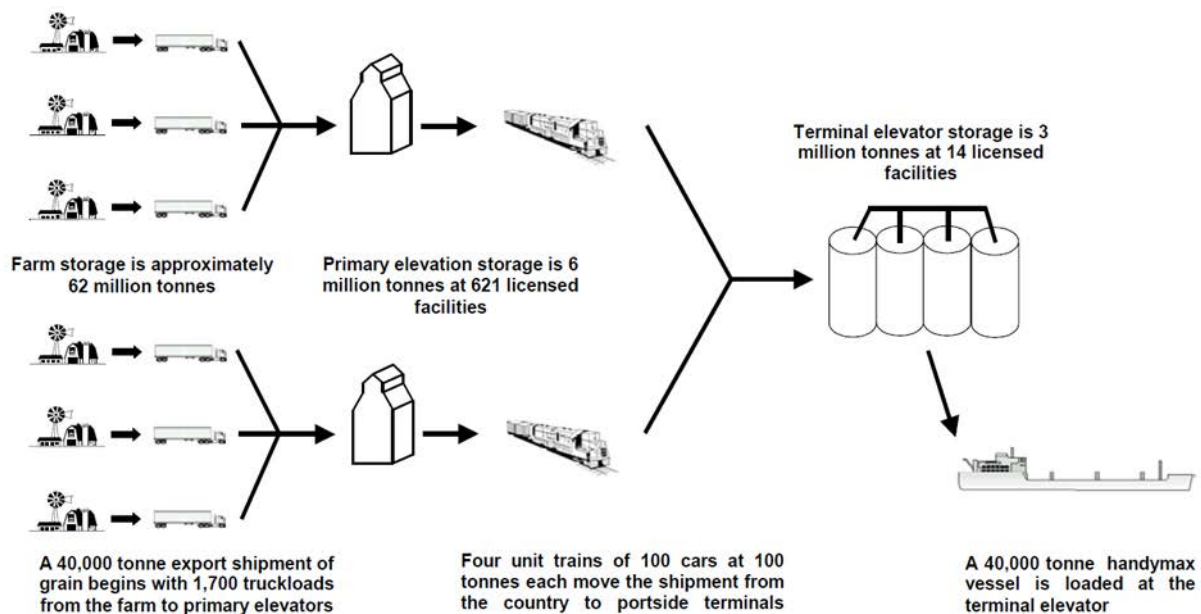


Рис. 1. Схема логістичних поставок зерна в порт

В середньому, логістичні витрати з транспортування товару можуть досягати 10% від вартості самого товару. Вартість експедиторських послуг варіюється від 2% до 20%, в залежності від вартості транспортування (фрахту). Якщо мова йде про масові перевезення – десятки тисяч тон зерна, вугілля, руди та ін., то вартість експедиторських послуг прив'язується до тоні вантажу. За контейнери, як правило, встановлюють фіксовану плату – до 100 дол. США, наприклад.

Розглянемо особливості організації доставки зерна в контейнерах. Контейнерні перевезення мають свою специфіку в порівнянні з судновими відправками. Незважаючи на те, що обсяги тут невеликі, потрібно бути готовим до того, що часу буде витрачено не менше, аніж з відправкою судна об'ємом вантажу в 80 тис. тон. Важливо досконально прораховувати і планувати кожен етап, оцінюючи різні можливі ризики. Звичайно ж, головним буде вибір професійного та надійного виконавця в сфері організації послуг контейнерних перевезень, який, використовуючи накопичений досвід, зможе правильно визначити і розрахувати перевезення «від дверей до дверей», оцінити можливі ризики і, що найголовніше, попередити їх.

В першу чергу, при виборі морського перевізника – контейнерної лінії, крім рівня фрахтової ставки, актуальне питання наявності потрібної кількості порожніх контейнерів і місця на судні.

Для перевезення зерна використовується стандартні універсальні 20-ти футові контейнери,

з допустимою масою брутто 30480 кг. Зерно завантажувється в контейнерний вкладиш.

Власне, для навантаження зерна в контейнер потрібен спеціальний вкладиш (лайн-бег) – величезний поліетиленовий пакет.

Для вирішення поставленої задачі було розглянуто два способи доставки партії товару: насипом і в контейнерах

Продавець поставляє обумовлену партію зерна пшениці на умовах CIF. Для відправки даної партії був задіяний експедитор, відповідальний за успішну реалізацію поставки товару в порт призначення.

Елеватор має в своєму розпорядженні стаф-фіровочний комплекс для наповнення контейнерів зерном, а також спеціалізовану рампу. Однак, даний відправник, звичайно ж, не володіє власними контейнерами – йому необхідно орендувати контейнери морського перевізника, послугами якого він скористається надалі.

На основі отриманих результатів побудовано порівняльну діаграму витрат компанії (рис. 2) при різних способах організації морського перевезення.

В результаті розрахунків було показано, що найкращим варіантом для перевезення партії зерна є використання власного судна. Однак, на сьогоднішній день власний флот можуть мати в своєму розпорядженні тільки великі землевласники і експортери зерна.

В нашому ж випадку, відправляючи малу партію насипного вантажу, швидше за все компанія-

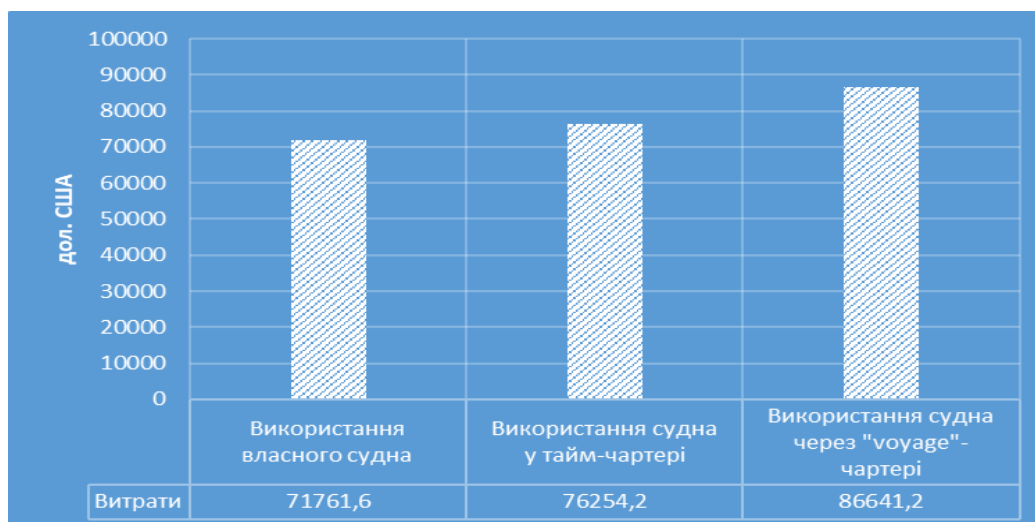


Рис. 2. Порівняння вартості витрат при різних способах організації морського перевезення

посередник буде виступати в ролі фрахтувальника судна через тайм-чартер, використовуючи його для виконання замовлень власних клієнтів.

Вартість транспортування зерна в контейнері при залізничній складовій наземної доставки виходить дешевше ніж аналогічна доставка при автомобільній складовій наземної доставки приблизно на 22%.

Великими статтями витрат при даному способі транспортування зерна є саме наземна і морська доставка партії вантажу.

За мірками насипного вантажу експортується мала партія, однак, при завантаженні даної партії в контейнери, виходить досить велика партія за мірками судноплавних ліній. А значить, маючи можливість організувати відправку партії заздалегідь, можна домовитися з лінією про виділення відповідної кількості обсягу порожніх контейнерів і виторгувавши собі більш вигідну вартість фрахту.

Беручи до уваги те, що немає необхідності більш швидкої доставки контейнерів в порт, а також через більш високу вартість транспортування автотранспортом, вибираючи з двох варіантів доставки вигідніше скористатися послугами національного залізничного оператора і перевезти вказану кількість контейнерів залізничним транспортом.

Очевидно, що при відсутності дефіциту на спеціалізовані вагони, варіант транспортування зерна насипом із залученням залізничного транспорту є найкращим раціональним варіантом доставки партії вантажу.

По отриманим результатам можна зробити висновки, що найбільш ефективним методом доставки зерна є метод доставки пшениці зерна

насипом із залученням залізничного транспорту при наземній складовій перевезення.

Висновки. Вартість морського фрахту (із врахуванням надбавок) при перевезенні контейнеру є завищеною, вартість ж морського фрахту під час перевезення зерна насипом на суховантажному судні та вантажно-розвантажувальних робіт з перевалки зерна – мінімальні. Тому, при відсутності хоперів у вільному доступі, зерно можна почати доставляти до портів перевалочних комплексів, за допомогою контейнерів, з подальшою перевалкою на суховантаж.

При небажаній кон'юктурі ринку, тобто при зростанні фрахтових ставок на використання балкерів, вигідніше буде доставляти контейнери із зерном, що перевозяться по Україні залізницею, а далі морем вже на контейнеровозі.

Підсумовуючи, в умовах швидко мінливої кон'юктурі ринку, перевезення зерна в контейнерах для малих партій стане відмінним виходом для мінімізації своїх витрат і підвищення збереженості вантажу. Залучення нового способу транспортування дозволить підвищити мобільність і незалежність гравців ринку від конкретних традиційних способів доставки. Все перераховане вище це говорить нам про те, що контейнер буде і залишається альтернативою використанню традиційних методів доставки зерна. В умовах швидко мінливої кон'юктурі ринку, перевезення зерна в контейнерах для малих партій стане відмінним виходом для мінімізації своїх витрат і підвищення безпеки вантажу, що перевозиться. Залучення нового способу транспортування дозволить підвищити мобільність і незалежність гравців ринку від конкретних традиційних способів доставки.

Список літератури:

1. Вернигора Р. В., О कोरोков А. М., Тітяпов В. І., Латаш С. О. Дослідження та оцінка ефективності логістичних схем перевезення зернових вантажів на експорт в умовах військового стану. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2024. № 28. С. 4–15. <https://doi.org/10.15802/tstt2024/312032>
2. Ломотко Д. В., Ільчишин В. М., Афанасов Г. М., Афанасова О. Ф. Вплив логістичної складової на зберігання та транспортування зерна в Україні. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. № 29. С. 52–58. <https://doi.org/10.15802/tstt2025/325407>
3. Шпак Н.Г., Павловська Л.А., Коробкова О.М. Дослідження митно-транспортних операцій при експорті зерна з України. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73) № 2 Ч. 2. С. 238-242. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/39>
4. Ковальський Ю. Розвиток інфраструктури логістичних маршрутів експорту зерна України в системі світової продовольчої безпеки. *Економіка та суспільство*. 2025. № 80. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-80-43>
5. Германюк Ю. М., Паленик І. О. Дослідження логістичних витрат при перевезенні вантажів аграрної групи автомобільним і залізничним видами транспорту. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2024. № 27. С. 71–82. <https://doi.org/10.15802/tstt2024/307370>
6. Україна від початку року екпортувала автотранспортом 115 тисяч тонн агропродукції. URL: https://cfts.org.ua/news/2026/02/16/ukrana_eksportovala_avtotransportom_111_tisyach_tonn_agroproduktsi_85888 (дата звернення 22.02.2026)
7. Менше пшениці та кукурудзи: як просів експорт зернових у новому сезоні. URL: https://24tv.ua/agro24/yak-zminivsyu-agrarniy-eksport-pshenitsi-kukurudzi-2025-26_n3030127 (дата звернення 20.03.2026)
8. У 2025/26 МР Україна збільшить експорт пшениці на 11,5%. URL: <https://agrotimes.ua/agromarket/u-2025-26-mr-ukrayina-zbilshyt-eksport-pshenyczi-na-115/> (дата звернення 25.02.2026)
9. Частка України у світовому експорті пшениці складає 7,9%. URL: <https://superagronom.com/news/20141-chastka-ukrayini-u-svitovomu-eksporti-pshenitsi-skladae-79> (дата звернення 23.01.2026)
10. Темпи експорту зерна з України залишаються на 23% нижчими, ніж торік. URL: <https://usm.media/tempy-eksportu-zerna-z-ukrayiny-zalyszajutjsia-na-23-nyrzschymy-nirzs-torik/> (дата звернення 20.03.2026)
11. Вільшанюк М. С., Судник Н.В. Обґрунтування умов ефективного транспортування пшениці з портів України. *Наукоємні технології ("Science-Based Technologies")*. 2023. № 1(57). С. 101-107. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.57.17450>

Vilshaniuk M.S. LOGISTICAL ASPECTS OF GRAIN EXPORTS: CHOOSING AN EFFICIENT DELIVERY METHOD

The article addressed the topic of commercial grain transport. This topic was not chosen by chance: grain production and subsequent export are a highly significant and substantial economic milestone in our country, and although developed nations are now entering the digital age, Ukraine has been and remains an agrarian country – 40% (in monetary terms) of the total volume of goods exported consists of agricultural produce. Today, Ukraine holds a leading position among the world's largest grain exporters. And at a time when the global population is growing exponentially, control and influence over the food market represent a colossal economic and political lever for our country.

With the development of international trade, natural agricultural advantages have transformed into the economic specialisation of countries in the global market as producers, exporters and consumers of various cereal crops.

Today, developing countries in the Asia-Pacific region (APR), primarily China, India and Indonesia, account for almost half of global grain production. Although China and India are global leaders in gross wheat harvests, they use virtually all of their grain production for domestic consumption. The leading exporters in this regard are the United States and Canada. An increase in grain production and, consequently, in exports, could significantly strengthen Ukraine's position on the global stage. Such a positive trend will undoubtedly improve the country's economic performance, as a significant proportion of export revenue is generated by the agricultural sector.

Recognising the relevance of the above-mentioned topic, it was important to set the following objective in this study: to improve the functioning of domestic grain transport processes from a commercial perspective. Although Ukraine remains an agrarian country, the technical equipment of our farms is on a par with that of leading nations – a considerable amount of money is invested by both residents and non-residents of the country to harvest as many tonnes of grain as possible from a single hectare of land.

This paper examines the process of transporting wheat, taking into account the Ukrainian land and sea components of freight delivery, and, based on the results obtained, the most economically viable method of delivery was selected for the freight forwarding company hired by the seller of the wheat consignment.

Keywords: grain, transport, container, seagoing vessel, export, freight forwarder.

Дата першого надходження статті до видання: 08.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Гільдєєв Д.О.<https://orcid.org/0009-0003-9173-6602>

Одеський національний морський університет

Онищенко С.П.<https://orcid.org/0000-0002-7528-4939>

Одеський національний морський університет

КОНЦЕПЦІЯ ВРАХУВАННЯ ВИКИДІВ ПРИ ФОРМУВАННІ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ

Метою даного дослідження є розробка концепції врахування викидів при формуванні та оптимізації систем доставки вантажів. Основна ідея полягає в тому, що при виборі варіанта системи доставки пропонується розглядати додатковий критерій – показник «сумарних викидів», який дозволяв би оцінити альтернативні варіанти системи доставки, яка відповідає певним експортним (імпортним) постачанням, що передбачають різні комбінації видів транспорту. Кожен рівень системи доставки та кожен її компонент впливає на величину викидів. Тобто йдеться про оцінку транспортуючих систем, що забезпечують доставку вантажів у межах певного проміжку часу, і є відносно постійною структурою. Розроблено концепцію врахування викидів при формуванні та оптимізації систем доставки вантажів. Згідно даній концепції варіювання технологією перевезень, географією пунктів (портів) перевалювання, складом транспортних та перевантажувальних засобів дозволить варіювати загальною величиною викидів при транспортуванні певної партії вантажу протягом певного періоду. Це дозволить формувати рішення щодо доставки в умовах досягнення балансу «витрати – викиди», що відповідає сучасним ідеологіям зеленої логістики та сталого розвитку. Запропонована концепція у подальшому має бути застосована при математичному моделюванні процесів формування та оптимізації систем доставки вантажів, складаючи відповідне теоретичне підґрунтя. На базі прогнозів щодо обсягів постачання для даної системи транспортування можуть бути зроблені оцінки за певний період, що дасть змогу побачити перспективу використання конкретного варіанту транспортування з точки зору впливу на довкілля та проаналізувати варіанти його мінімізації.

Ключові слова: викиди, сталий розвиток, зелена логістики, морські перевезення, контейнерні перевезення, технологія транспортування.

Постановка проблеми. Останні десятиліття відбуваються стрімкі зміни в усіх галузях економіки, зокрема, і на транспорті. Трансформація сучасної системи поглядів на бізнес та технології відображає концепція сталого розвитку [1,2], яка у частині екологічної складовій перетинається з концепцією зеленої логістики. Тому сучасні тренди, у тому числі й у технологічних рішеннях на транспорті, спрямовані на зниження шкоди зовнішньому середовищу. Таким чином, зусилля сучасного прогресивного людства, що відображаються в глобальних трендах, спрямовані на поступову мінімізацію шкоди навколишньому середовищу від технологій у всіх сферах життєдіяльності людини.

Слід зазначити, що на міжнародному рівні в рамках відповідних організацій розробляються документи, що регламентують ті чи інші умови функціонування різних виробничих/технологічних об'єктів з погляду шкоди навколишньому середовищу. Зокрема, ІМО за останні десятиліття розробило значну кількість нормативних документів щодо мінімізації викидів, пов'язаних з морським транспортом. Але будь-який транспортний засіб, що відповідає всім сучасним вимогам з погляду шкоди зовнішньому середовищу, працює у певній системі, і, як правило, значна частка транспортувань здійснюється з використанням комбінації різних видів транспорту. Безумовно, це на 100% відноситься до морського

та річкового транспорту, які завжди працюють у системі доставки, щонайменше передбачає використання двох сухопутних ділянок – до порту і від порту – або автомобільним, або залізничним транспортом. Деякі системи транспортування, що пов'язані з експортом продукції, можуть включати не лише сухопутні ділянки, а й комбінації «морське перевезення» плюс «річкове перевезення». Таким прикладом може бути доставка експортного зерна з України з використанням транспортування «автоперевезення»/«залізничне перевезення» – «річкове перевезення по Дніпру» – «морське перевезення»-«автоперевезення»/«залізничне перевезення». Як правило, основним критерієм при формуванні зазначених систем транспортування є сумарні витрати, мінімізація яких сприяє максимізації прибутку експортерів та виробників. Але, у відповідності до сучасних глобальних трендів, слід оцінювати дані системи транспортування також і з точки зору впливу на навколишнє середовище. Таким чином, виникає проблема оцінки та оптимізації негативного впливу на довкілля систем доставки вантажів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Якщо раніше важливим аспектом транспортування була його вартість, то, з урахуванням розвитку ідей логістики, з'явилися комплексні вимоги – час, вартість, надійність. Тому вантажовласники формували вже систему умов при виборі варіанта доставки з багатьох альтернатив, балансуючи в рамках залежності «час – надійність–вартість» [3,4]. Сьогодні, в умовах поширення ідеології сталого розвитку та усвідомленого ставлення бізнесу до навколишнього середовища, транспортування отримує новий критерій, який доповнює існуючу систему, а саме, «CO₂ викиди».

У сучасних публікаціях значну увагу присвячено питанням мінімізації викидів CO₂ у транспортній сфері, але, як правило, йдеться безпосередньо, про транспортні засоби – морські судна, наприклад, або автотранспорт. У відповідності до концепцій зеленої логістики та зеленого судноплавства в сучасних публікаціях розглядаються різні технологічні рішення для мінімізації негативного впливу транспортного засобу на довкілля [5,6].

Проте лише незначна частина сучасних досліджень присвячена питанням врахування викидів CO₂ при доставці вантажів з погляду вантажовласника або організатора доставки на усю систему, що передбачає оцінку негативного впливу на довкілля всіх елементів доставки – транспорт-

них та перевантажувальних засобів, задіяних у транспортному процесі. Винятками є публікації [7,8]. Наприклад, в [7] досліджується визначення розташування розподільчого складу для торгової мережі таким чином, щоб викиди CO₂ автотранспорту, задіяного в обслуговуванні даної системи розподілу, були мінімальними. Таким чином, можна простежити зміщення акцентів у дослідженнях, пов'язаних з питаннями транспорту та логістики, – від мінімізації витрат та відстаней – до мінімізації негативного впливу на довкілля. Отже, залишаються відкритими питання дослідження негативного впливу та викидів CO₂ в рамках систем доставки, що передбачають, наприклад, інтермодальне або змішане перевезення. Якщо в системах доставки, пов'язаних тільки з автотранспортом, що, власне, і розглядалося в окремих дослідженнях, основний акцент робиться на маршрутизації та оптимізації швидкості для мінімізації викидів (наприклад, у [8]), то для змішаних та інтермодальних перевезень виникає варіативність не тільки в маршрутах, але і в схемах доставки (з урахуванням варіації портів перевалки), кількості морських ділянок у видах транспорту (автотранспорт – залізничний транспорт) на сухопутній ділянці. У роботах [3,4] розглядалися питання оптимізації подібних систем доставки з урахуванням часу, витрат та надійності. Класичним підходом у таких задачах є вибір одного з критеріїв як головного, який і відіграє роль критерію оптимізації, а інші критерії використовуються як обмеження. У [3] крім варіації схемами доставки та видами транспорту, також розглядалися альтернативні варіанти перевізників на кожній ділянці схем, що дозволяло комплексно оптимізувати різні структури, які пов'язані з системою доставки, – топологією доставки (набором географічних ділянок доставки), видами транспортних засобів, складом учасників. Слід зазначити, що роботи [3,4] пов'язані з мультимодальною доставкою, але це передбачає відсутність варіації технологією перевезення, оскільки апіорі використовується контейнерна транспортно-технологічна система. Однак, при вирішенні подібних питань з іншими категоріями вантажів (наприклад, зерна чи металу), у деяких ситуаціях виникає і можливість варіації технологічними рішеннями. Зокрема, у [9] представлена система можливих рішень в рамках варіації технологіями перевезення з використанням водного транспорту.

Таким чином, на базі аналізу сучасних практичних викликів транспортного ринку та теоретичної бази оптимізації систем доставки вантажів,

виявлено певне протиріччя, що обґрунтовує необхідність усунення цієї суперечності шляхом дослідження питань оптимізації систем доставки вантажів з урахуванням їхнього негативного впливу на навколишнє середовище у комплексі від традиційними критеріями до транспортуючих систем.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка концепції врахування викидів при формуванні та оптимізації систем доставки вантажів для забезпечення її відповідності сучасним вимогам та глобальному тренду сталого розвитку.

Виклад основного матеріалу. Основна ідея цього дослідження полягає в тому, що при виборі варіанта системи доставки пропонується розглядати додатковий критерій – показник «сумарних викидів», який дозволяв би оцінити альтернативні варіанти системи доставки, яка відповідає певним експортним (імпортним) постачанням, що передбачають різні комбінації видів транспорту. Тобто йдеться про оцінку транспортуючих систем, що забезпечують доставку вантажів у межах певного проміжку часу, і є відносно постійною структурою, як це зазначено у [10]. Таким чином, при прийнятті рішень щодо вибору найбільш ефективного варіанта системи доставки виникає можливість урахування не тільки економічних факторів, а й впливу цього варіанту на навколишнє середовище, а це дає можливість приймати рішення, забезпечуючи баланс «ефективність економічна» – «ефективність екологічна». Такий підхід відповідає концепції зеленої логістики [11].

Сумарні викиди системи доставки є інтегральним показником, який враховує всі технологічні ланцюжки та всі транспортні та перевантажувальні засоби, що задіяні у транспортуванні цією системою заданої партії вантажу Q (т). Більше того, на базі прогнозів щодо постачання Q для даної системи транспортування можуть бути зроблені оцінки за певний період (наприклад, п'ять і більше років), що дасть змогу побачити перспективу використання конкретного варіанту транспортування з точки зору впливу на довкілля та проаналізувати варіанти його мінімізації.

Слід зазначити, що з усього різноманіття шкідливих викидів саме CO_2 слід прийняти в якості критерію, з урахуванням того, що більшість нормативних документів національного та міжнародного рівнів пов'язані саме з ними. Надалі, не обмежуючи загальності, розглядатимемо варіант одного виду викидів, що при необхідності може бути поширене на будь-яку множину шкідливих речовин. Отже, позначимо сумарні викиди CO_2 системи доставки:

$$E(Q), \quad (1)$$

де Q – обсяг постачань в рамках заданого часового періоду (в тоннах або в TEU).

Слід зазначити, що система доставки характеризується [10]:

1) географічним розташуванням пунктів відправлення, призначення та перевалки – топологія системи;

2) операціями транспортно-технологічного процесу відповідно до обраної технології транспортування;

3) складом транспортних та перевантажувальних засобів відповідно до операцій транспортно-технологічного процесу;

4) складом конкретних учасників, тобто підприємств, які здійснюють операції транспортно-технологічного процесу.

Кожен рівень системи доставки та кожен її компонент впливає на величину викидів. Наприклад, дистанція перевезення між пунктами визначає необхідний час перевезення, що впливає на кількість викидів на цій ділянці. Транспортний засіб конкретного перевізника має певну специфіку в контексті викидів, наприклад, однакового дедвейту та спеціалізації судна можуть використовувати різні види палива, відповідно, рівень їх викидів відрізняється.

Інший важливий аспект для системи доставки – її межі. У [3] для різних систем доставок з використанням водного транспорту представлені варіанти меж системи залежно від транспортних умов контракту. Наприклад, якщо йдеться про експортні поставки на умовах CIF, то межі системи включають морське перевезення, якщо на умовах FOB – то система закінчується в портах відправлення. Звичайно, в ідеальному варіанті для оптимізації викидів системи доставки, пов'язаної з певними постачаннями, слід розглядати повну систему – від пунктів зародження постачання до кінцевого споживача – ланцюга постачання в цілому. Але, зазвичай, така всеохоплююча система доставки пов'язана з кількома незалежними суб'єктами, кожен із яких відповідає і контролює лише власну частину і не може впливати на рішення інших учасників (рис.1).

Таким чином, для систем транспортування, що відповідають ланцюгам постачань, кількість пунктів відправлення, перевантаження та призначення значно більша, з урахуванням специфіки ланцюгів поставки. Системи транспортування, що відповідають експортним (імпортним) постачанням, по суті є частиною подібних систем для ланцюгів постачання. Різниця фор-

мується за рахунок «меж», що розглядаються. Наприклад, можна розглянути всю логістику зерна – доставка врожаю до польових елеваторів, далі портових зернових терміналів, і далі перевезення морем до порту країни-імпортера. Також можна розглянути варіант «менших» меж – від польових елеваторів.

Варіант розгляду залежить від меж відповідальності – мається на увазі відповідальність конкретного суб'єкта, який приймає рішення: якщо йдеться про експортера, який купує зерно у виробника – для нього «межі» системи, що розглядається, менше; якщо йдеться про виробника, який і є експортером – для нього «кордони» ширші та охоплюють усю представлену вище систему.

На рис.2 межі експортних поставок починаються з річкового порту і закінчуються морським перевезенням, межі ланцюгів поставок починаються від складів у пунктах зародження вантажів. Природно, що дан є лише одним із узагальнених варіантів для демонстрації висловлених ідей.

Як відомо, кожен транспортний засіб викидає в навколишнє середовище цілий спектр шкідливих речовин. Для кожного виду транспорту та типу транспортного засобу існують відповідні розрахункові формули для встановлення розміру

(обсягів) цих викидів. Крім того, аналогічні формули розглядаються і для перевантажувального обладнання, зокрема, [12] проведені порівняльні дослідження викиду CO₂ для різного обладнання контейнерних терміналів.

Існуючі формули оцінки викидів транспортних засобів і перевантажувального обладнання враховують основні параметри, що впливають, і, перш за все, тип двигуна (його потужність). Для морських суден відповідна формула складніша і враховує три компоненти – основний двигун, допоміжний та бойлер, а також співвідношення експлуатаційної та паспортної (максимальної) швидкості [7]. У будь-якому випадку, для кожного задіяного транспортного та технологічного (перевантажувального) елемента в системі транспортування, залежно від конкретного типу та моделі (для автомобілів), а також «середньостатистичного» режиму роботи (з точки зору швидкості, наприклад), можуть бути встановлені обсяги викидів в одиницю часу. Час роботи кожного елемента залежить від обсягу поставок Q , а також відстань перевезень (для транспортних засобів).

Отже, розглянемо найбільш загальні параметри, що впливають – Q обсяг поставок і від-

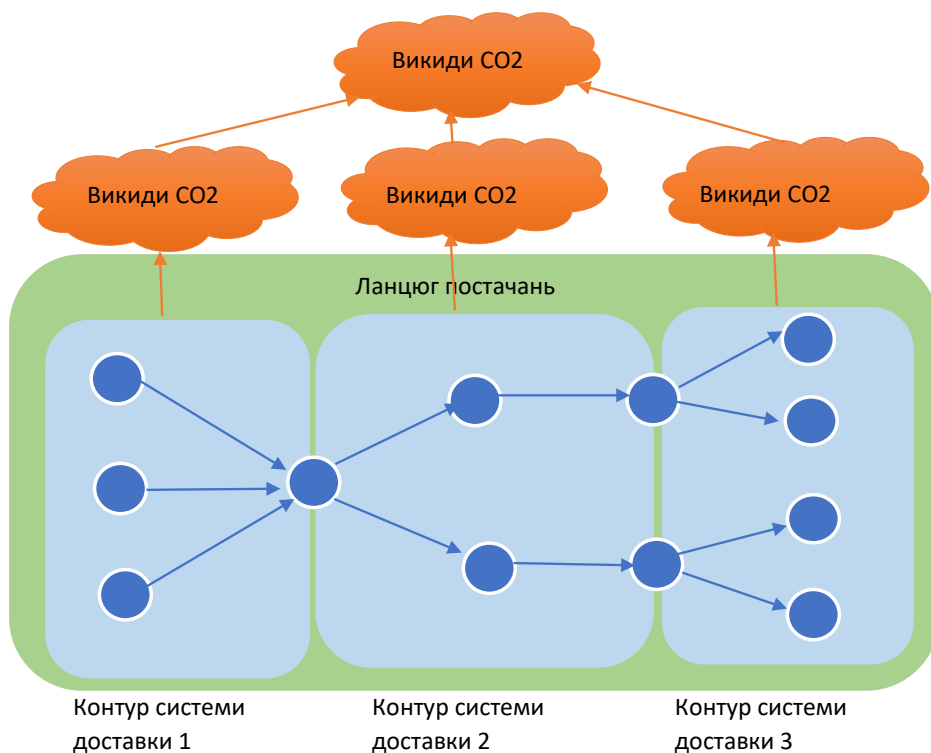


Рис. 1. Системи доставки, що пов'язані з ланцюгом поставок

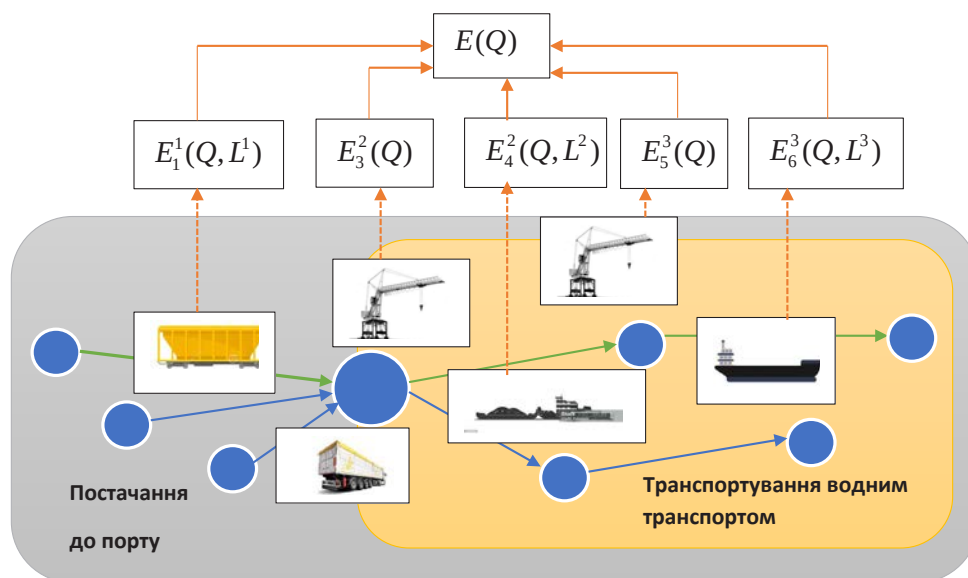


Рис. 2. Приклад системи доставки з використанням водного транспорту, яка відповідає експортним постачання

стані перевезення L , яке враховується, природно, тільки для транспортних засобів.

Таким чином, кожному транспортному засобу системи доставки відповідає обсяг викидів:

$$E_k^j(Q, L^j), j = \overline{1, m}, k \in \Omega_j; \quad (2)$$

перевантажувальному обладнанню відповідає обсяг викидів:

$$E_g^j(Q), j = \overline{1, m}, g \in \Psi_j \quad (3)$$

де m - кількість ділянок у системі, Ω_j - множина транспортних засобів, Ψ_j - множина перевантажувальних засобів, що у технологічному процесі ділянки $j = \overline{1, m}$, L^j - відстань перевезення на ділянці.

Формули оцінки викидів, що традиційно використовуються, з урахуванням усередненої швидкості та відстані перевезення для транспортних засобів, можуть бути трансформовані у вигляд (3). Для перевантажувального обладнання аналогічна трансформація у вигляд (4) може бути здійснена з урахуванням продуктивності та кількості вантажу.

На рис.2 для однієї гілки ланцюгів поставок представлені відповідні викиди кожного задіяного елемента на трьох ділянках – залізничного та автомобільного перевезення ($j=1$), річкового перевезення ($j=2$), морського перевезення ($j=3$). Види транспортних засобів: $k=1$ – вагони-зерновози, $k=2$ – автомобілі-зерновози, $k=3$ – перевантажувальне обладнання в річковому порту, $k=4$ – річ-

кові баржі, $k=5$ – перевантажувальне обладнання в морському порту, $k=6$ – морське судно. Сумарні викиди для системи (її частини на рис. 2) формуються як сума викидів задіяних транспортних (технологічних) елементів.

У загальному випадку сумарні викиди становлять:

$$E(Q) = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{k \in \Omega_j} E_k^j(Q, L^j) + \sum_{g \in \Psi_j} E_g^j(Q) \right). \quad (4)$$

Дана формула (4) дозволяє оцінити сумарний обсяг викидів для системи доставки будь-якої конфігурації, що надалі може бути використане для вирішення задачі оптимізації даної системи з урахуванням балансу «витрати»-«викиди».

Таким чином, в процесах формування та оптимізації систем доставки слід прийняти до увазі додатковий критерій – загальні викиди згідно (4) у відповідності до структури системи. Варіювання географічним розташуванням елементів схем доставки, які відповідають даній системі, а також технологій транспортування та транспортними засобами дозволить створити альтернативні варіанти системи доставки, які відрізняються не тільки загальними витратами, а також й загальними викидами. Отже, при побудові відповідних оптимізаційних моделей слід враховувати $E(Q)$.

Висновки. У даному дослідженні запропонована концепція врахування викидів при формуванні та оптимізації систем доставки вантажів. Згідно даній концепції варіювання технологією перевезень, географією пунктів (портів) перева-

лювання, складом транспортних та перевантажувальних засобів дозволить варіювати загальною величиною викидів прим транспортуванні певної партії вантажу протягом певного періоду. Отже, досягнення певного балансу «витрати – викиди» відповідає сучасним ідеологіям зеленої логістики та сталого розвитку, що сьогодні є необхідним

при відповідальному відношенні людства та бізнесу до навколишнього середовища.

Запропонована концепція у подальшому має бути застосована при математичному моделюванні процесів формування та оптимізації систем доставки вантажів, складаючи відповідне теоретичне підґрунтя.

Список літератури:

1. Zampori L., Pant, R. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2019. 00654-1. DOI: 10.2760/424613.
2. Sala S., Benini L., Castellani V., Vidal Legaz B., De Laurentiis V., Pant R. Suggestions for the update of the Environmental Footprint Life Cycle Impact Assessment. Impacts due to resource use, water use, land use, and particulate matter, EUR 28636 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2019. DOI:10.2760/78072.
3. Берестенко В.В., Онищенко С.П. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. 1(12). С. 118-128. DOI:10.33082/td.2022.1-12.10
4. Berestenko V., Onyshchenko S. Defining compromise area in the processes of multimodal delivery organization within the agile approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 1(3 (127)). P. 78–86. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.298846
5. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. № 127. P. 165-188. DOI: 10.20858/sjsutst.2025.127.10
6. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S. Renewable Energy Concept Development and Application in Shipping Industry. *Lex Portus*. 2023. № 9(6) P. 15–24. DOI: 10.26886/2524-101X.9.6.2023.2
7. Dukkanci Okan, Kara, Bahar, Bektas, Tolga. The Green Location-Routing Problem. *Computers & Operations Research*. 2019. 105. DOI: 10.1016/j.cor.2019.01.011.
8. Wang Ying, Duan Jicong, Sun Jiajun, Zhang Qin, Ye Taofeng. A Green Vehicle Routing Problem with Time-Varying Speeds and Joint Distribution. *Sustainability*. 2025. 17. 7515. DOI: 10.3390/su17167515.
9. Rusanova S., Onyshchenko S. Development of Transport and Technological Process Options' Concept for Goods Delivery with Participation of Maritime Transport. *Technology audit and production reserves*. 2020. 1 (2 (51)), 24-29. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.198373
10. Берестенко В.В., Онищенко С.П. Структура й характеристики мультимодальної доставки з позиції цифровізації. *Розвиток транспорту*. 2022. (4(11)). 82-93. DOI: 10.33082/td.2021.4-11.08
11. Букресва Д., Коваленко Т., Манукян А. «Зелені» стратегії для сталого розвитку підприємства та підвищення ефективності його діяльності. *Економіка та суспільство*. 2023. № 56. DOI: 10.32782/2524-0072/2023-56-121
12. Budiyanto M.A., Huzaifi, M.H., Sirait, S.J. et al. Evaluation of CO2 emissions and energy use with different container terminal layouts. *Scientific Reports*. 2021. 5476 DOI: 10.1038/s41598-021-84958-4

Gildeev D.O., Onyshchenko S.P. CONCEPT OF THE CARGO DELIVERY SYSTEMS FORMATION AND OPTIMIZATION TAKING INTO ACCOUNT EMISSIONS

The purpose of this study is to develop a concept for taking emissions into account when forming and optimizing cargo delivery systems. The main idea is that when choosing a delivery system option, it is proposed to consider an additional criterion – the "total emissions" indicator, which would allow evaluating alternative delivery system options that correspond to certain export (import) deliveries that involve different combinations of transport modes. Each level of the delivery system and each of its components affects the amount of emissions. That is, we are talking about an assessment of transportation systems that ensure the delivery of goods within a certain period of time and are a relatively constant structure. A concept for taking emissions into account when forming and optimizing cargo delivery systems has been developed. According to this concept, varying transportation technology, geography of transfer points (ports), composition of transport and transshipment vehicles will allow varying the total amount of emissions when transporting a certain batch of cargo during a certain period. This will allow to form decisions on delivery in the conditions of achieving a balance of "costs – emissions", which corresponds to modern ideologies of green logistics and sustainable development. The proposed concept should be further applied in mathematical modelling of the processes of formation and optimization of cargo delivery systems, forming an appropriate theoretical basis. Based on forecasts of supply volumes for a given transportation system, estimates can be made for a certain period, which will allow to see the prospects of using a specific transportation option from the point of view of environmental impact and to analyse options for its minimization.

Keywords: emissions, sustainable development, green logistics, maritime transportation, transportation technology, container transportation.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Єсєв А.І.

<https://orcid.org/0009-0007-6298-776X>

Національний університет «Одеська морська академія»

МОДЕРНІЗАЦІЯ РЯТУВАЛЬНИХ ШЛЮПОК З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

У статті розглянуто призначення, влаштування та вимоги діючих міжнародних конвенцій і товариств до колективних рятувальних засобів морських суден, основними з яких є рятувальні шлюпки. Рятувальні шлюпки морських суден повинні забезпечити збереження життя людей, що терплять лихо, з моменту залишення ними судна.

Обладнання та технічний стан шлюпок має відповідати цілій низці вимог: Правилам щодо обладнання морських суден (2026 р. з врахуванням змін і доповнень) та врахуванням, змін до застосованих міжнародних конвенцій та кодексів, прийнятих відповідними резолюціями Міжнародною морською організацією (ІМО), уніфікованим вимог і рекомендаціям Міжнародної асоціації класифікаційних товариств (МАКТ) і змін до застосованих резолюцій Європейської економічної комісії ООН і директив Європейського Парламенту та Ради, змінам і доповненням, прийнятим за результатами аналізу Правил інших Класифікаційних товариств, а також з досвіду їх застосування. Описано пристрій та аналіз роботи рухової установки морської рятувальної шлюпки із традиційною системою енергопостачання. Розглянуто розвиток, сучасні технології та використання сонячних панелей. Проведено аналіз останніх технічних рішень і досвіду, який показує зростаючий інтерес до альтернативних джерел електроенергії на морському транспорті. Найпоширенішим джерелом альтернативної енергії є енергія сонця, отримана з використанням сонячних панелей. Розгляд застосування сонячних енергетичних систем на борту суден вказує на те, що існують деякі фактори, які можуть вплинути на це застосування. Ці фактори включають: наявність високої сонячної радіації протягом рейсу судна, наявність достатньої площі палуби, відкритої для сонця, наявність відповідної фотоелектричної системи, підключеної до мережі, розрахунок і техніко-економічний вибір наявних сонячних панелей. Розглянуто основні типи сучасних сонячних панелей та технології їх виготовлення. Запропоновано варіант модернізації рятувальної шлюпки із використанням сонячної панелі для забезпечення заряду акумуляторних батарей. Надано практичні рекомендації щодо ходу та виконання робіт пов'язаних з модернізацією існуючих рятувальних шлюпок морських суден.

Ключові слова: рятувальна шлюпка, акумуляторна батарея, сонячна панель, струм, напруга, двигун.

Постановка проблеми. Серед різних сфер діяльності людини одними з найбільш небезпечних є ті, які пов'язані з роботою на морському транспорті і необхідністю перебування людей в морі будучи членами екіпажів (а також пасажирами) морських суден. Морське судно є досить складним інженерним спорудженням і водночас плавучим транспортним засобом. Небезпека для життя людини викликається зазвичай аварійною ситуацією, яка може виникати на судні, починаючи з моменту виходу його в рейс і закінчуючи поверненням в порт. Існує певна низка судових аврій, що тягнуть за собою серйозні наслідки. Зрозуміло, що у разі виникнення аварійної ситуації на судні передбачаються термінові заходи щодо її усунення (боротьба за живучість судна).

Однак може виникнути ситуація, коли всі заходи по порятунку судна прийняті і подальша боротьба за живучість не дає позитивного результату та екіпаж має залишити судно. Для евакуації людей на кожному судні передбачаються колективні рятувальні засоби (рятувальні шлюпки та плоту). Для рятування екіпажу і пасажирів основним активним рятувальним засобом є шлюпки. Рятувальні шлюпки – це спеціально розроблені колективні рятувальні засоби, які використовуються для рятування із судна. Згідно з вимогами відповідних міжнародних конвенцій вони оснащені всім необхідним обладнанням та спроектовані таким чином, щоб витримувати екстремальні умови експлуатації. Рятувальні шлюпки зазвичай використовуються для евакуації людей із пото-

паючих або пошкоджених суден, проте їх також можна використовувати для пошуково-рятувальних операцій, медичної евакуації та інших видів екстреного реагування. Впровадження нових матеріалів та технологій ознаменувало новий етап розвитку та ще більше підвищило безпеку та функціональність рятувальних шлюпок. Сучасні рятувальні шлюпки зазвичай виготовляються зі скловолокна або алюмінію і рухаються за допомогою ефективних двигунів внутрішнього згоряння (дизелів). Запуск двигуна забезпечується електростартером, який має живлення від спеціально передбаченої акумуляторної батареї яку необхідно підтримувати у зарядженому стані. Для заряду (підзаряду) батареї використовуються судові стаціонарні або портативні зарядні пристрої. У період, коли шлюпка спущена на воду (перебуває в морі), заряд (підзаряд) батареї здійснюється за рахунок навісного генератора. Причому генератор має привід від двигуна і відповідно працює разом з ним, що призводить до додаткової витрати палива, запас якого досить обмежений. У разі евакуації з судна в шлюпці та очікування подальшої допомоги (порятунку), люди можуть перебувати в шлюпці досить тривалий час – від кількох годин до кількох днів. Використання додаткового альтернативного джерела електроенергії у вигляді сонячної панелі дозволяє оптимізувати процес заряджання акумуляторної батареї без роботи двигуна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження показують, що енергоефективність на судах набуває все більшого значення через посилення екологічних стандартів, а також економічні вигоди від скорочення споживання палива. Зокрема, Міжнародна морська організація встановила Індекс енергоефективності проєктування (EEDI) та План управління енергоефективністю судна (SEEMP) як основні нормативні вимоги до судноплавства для скорочення викидів CO₂ та підвищення ефективності використання палива. Окрім нормативно-правової бази, дослідження акцентують увагу на інноваційних технічних рішеннях для оптимізації енергоспоживання суден.

Перетворення сонячної енергії в електричну здійснюється за допомогою фотоелектричних сонячних батарей. Технології сонячної енергії почали активно впроваджуватись у різні сфери, і морська індустрія не стала винятком. Сонячні панелі на яхтах та човнах забезпечують безліч переваг, починаючи від незалежності від традиційних джерел енергії та закінчуючи мініміза-

цією впливу на навколишнє середовище. Основні складнощі застосування сонячних батарей на морських судах пов'язані з високою металомісткістю, їх ціною, а також необхідністю відведення для їх розміщення великих площ. Тому, поки що на сьогодні, їх застосування на морських транспортних і пасажирських судах обмежене. Винятком є маломірні судна (катери та яхти) з низьким енергоспоживанням. Тому ряд останніх розробок з подальшим обладнанням суден, що будуються, а також суден, що перебувають в експлуатації, відносяться до них. Сонячна енергія на катерах та яхтах забезпечує автономність, заряджаючи акумулятори для побутових потреб або живлення двигунів. Використовуються жорсткі та гнучкі фотопанелі (на біміні), що знижує залежність від дизпалива та викиди CO₂. Панелі потужністю 150 Вт генерують близько 560 Вт·год на день, забезпечуючи роботу навігації та приладів. Однією з ключових переваг є незалежність від традиційних джерел енергії, таких як дизельні генератори. Іншою важливою перевагою є значна економія палива. Використання енергії, отриманої від сонця, виключає необхідність постійних витрат на дизельне паливо або інші види енергії, що призводить до зниження експлуатаційних витрат протягом усього терміну експлуатації судна.

До останніх розробок та трендів 2024-2026 років можна віднести:

- Інтегрована сонячна шкіра (Solar Skin): Панелі не встановлюються поверх, а інтегруються в структуру корпусу, щогл і даху (технологія Sunreef Yachts Eco). Вони тонші за 1 мм, легкі, удароміцні та вигнуті, що не псує естетику яхти.

- Нескінченна автономність (Silent Yachts/Serenity): Електромотори живляться від потужних батарей, які постійно заряджаються від сонця. При крейсерській швидкості (5-7 вузлів) яхта може йти достатньо довгий час (більше доби).

- Гібридні катамарани (Sunreef ULTIMA): Поєднання комфорту люкс-катамарана з екологічністю, що забезпечує високу швидкість та повну тишу під час відпочинку.

Останні концепції, такі як 40-метровий Explorer Eco від Sunreef Yachts, доводять, що сонячні технології готові для суперяхт, забезпечуючи роботу всіх систем без використання палива. Як видно з матеріалів останніх розробок та практичного їх застосування, широке використання сонячної енергії на морському транспорті знайшло застосування лише на маломірних судах. На морських транспортних, пасажирських та рибпромислових судах, які складають більшу частину

світового флоту, існує можливість застосування сонячних батарей на рятувальних шлюпках. У цій статті розглянуто необхідність та можливість застосування альтернативного джерела електроенергії у вигляді сонячних батарей на рятувальних шлюпках, а також методи їх використання та експлуатації.

Постановка завдання. Метою статті є визначення можливості використання сонячних панелей у енергопостачанні морських рятувальних шлюпок. Зокрема, завдання полягає у наданні інформації щодо аспектів забезпечення безпеки мореплавання та порятунку людей на морі, які ґрунтуються на міжнародних морських конвенціях. Розглянуто застосування альтернативного джерела електроенергії у вигляді сонячної батареї на типовій рятувальній шлюпці, а також методи її монтажу і подальшої експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Комплектація суден рятувальними

засобами проводиться відповідно до вимог Міжнародної конвенції СОЛАС (SOLAS)-86, яка визначає мінімальний рівень обладнання суден для рятування людей. На підставі вимог СОЛАС (SOLAS)-86 всі судові рятувальні засоби поділяються на дві основні групи: індивідуальні та колективні.

Для рятування екіпажу і пасажирів основним активним колективним

рятувальним засобом є шлюпки [3, с. 21]. Число шлюпок на борту судна визначається районом плавання, типом судна і чисельністю людей на борту. Вантажні судна обладнуються шлюпками, що забезпечують весь екіпаж з кожного борту (100%) [3, с. 46]. Пасажирські судна обладнуються шлюпками місткістю 50% пасажирів і екіпажу з кожного борту (100%) [3, с. 39].

Морські рятувальні шлюпки – це спеціалізовані малі судна, розміщені

на борту судна і призначені для безпечної евакуації екіпажу та пасажирів у надзвичайних ситуаціях (SOLAS). Рятувальні шлюпки виготовляються зі скловолокна та оснащуються дизельними двигунами, забезпечують відповідні мореплавні якості та захист від ударних навантажень і погодних умов.

Основні типи рятувальних шлюпок:

- Закриті (герметизовані): повністю закриті рятувальні шлюпки, що забезпечують захист від негоди та ударів.

- Вільного падіння (free-fall): шлюпки, які спускаються на воду за допомогою спеціальної рампи, забезпечуючи швидку евакуацію.

- Відкритого типу: використовуються, як правило, на невеликих судах, на відміну від закритих, не захищають від прямого впливу стихії.

- Чергові шлюпки: призначені для швидкого збору людей з води або збору рятувальних плотів.

Основні вимоги, що пред'являються до рятувальних шлюпок:

- хороша остійність, достатній запас плавучості, гарна маневреність;

- надійне повернення на киль після перекидання; механічний двигун, швидкість на тихій воді не менше 6 вузлів; захищений від ударів гребний

- гвинт; корпус повинен бути пофарбований в помаранчевий колір.

Сучасні морські судна обладнуються рятувальними шлюпками тільки закритого типу з жорсткою надбудовою.



Рис. 1. Сучасна рятувальна шлюпка закритого типу на плаву

Ключові характеристики та вимоги (SOLAS/LSA Code):

- Матеріали: Міцне скловолокно, стійке до атмосферних впливів.

- Захист: герметизація забезпечує захист від шкідливого впливу навколишнього середовища.

- Доступ всередину: забезпечується через люки, які повинні легко закриватися і відкриватися зсередини і ззовні. Через ілюмінатори всередину шлюпки має проникати достатньо денного світла. Кожне посадкове місце обладнується ремнем безпеки, який повинен надійно утримувати людину масою 100 кг у випадку, якщо шлюпка знаходиться в перекинутому положенні.

- Спускові пристрої: розроблені для швидкого спуску та відходу від судна на безпечну відстань.

- Двигун: кожна шлюпка обладнана надійним двигуном для самостійного руху.

Детальні вимоги до огляду шлюпок були прийняті Міжнародною морською організацією

(ІМО) у резолюції MSC.402 (96). Згідно з цим документом, на шлюпках ретельному огляду підлягає протипожежна система, кранці, система подачі повітря, система маневрування, система порятунку, силова установка та двигун, система електроживлення. Всі рятувальні шлюпки повинні бути сертифіковані на відповідність діючим нормам ІМО/SOLAS, а також вимогам міжнародних морських класифікаційних товариств (Правила класифікації та побудови морських суден / Регістр судноплавства України).

Порядок евакуації людей з судна, що потерпає від загибелі.

Рішення щодо залишення судна приймає тільки капітан. Цьому має передувати серйозний аналіз стану судна. Це крайнє рішення приймається в наступних випадках:

- явні ознаки загибелі судна – вхід верхньої палуби в воду, небезпечний крен або диферент, які постійно збільшуються;
- судно залишається на плаву, але припинити надходження води неможливо; – значне зміщення вантажу або обмерзання судна, причому екіпаж не має можливості з цим боротися;
- пожежа, що поширюється по судну, і немає можливості її ліквідувати;
- судно дрейфує на рифи, не маючи управління [2, с. 23-24].

Боротьба за живучість судна вирішує два завдання: рятування людських життів і рятування матеріальних цінностей. Однак, треба розуміти, що збереження судна – гарантія виживання людей, так як ймовірність загибелі в морі на рятувальних засобах досить велика. Тому рішення про залишення судна приймається тільки тоді, коли всі заходи по порятунку судна прийняті.

Під евакуацією людей розуміють комплекс заходів, здійснюваних з менту подачі сигналу "Залишити судно" до відходу рятувальних засобів на безпечну відстань. Залишення судна приймається тільки тоді, коли всі заходи по порятунку судна прийняті [2, с. 24].

Як було зазначено, рятувальні шлюпки обладнуються дизельним двигуном та забезпечуються запасом палива на 24 години його роботи за номінального навантаження забезпечуючого рух повністю навантаженої рятувальної шлюпки зі швидкістю 6 вузів [3, с. 75-76]. При чому запуск двигуна забезпечується за рахунок електростартера з використанням кислотних стартерних акумуляторних батарей (одна – робоча, друга – резервна) які постійно повинні перебувати у зарядженому стані [3, с. 76]. Оскільки акумуляторна

батарея має властивість саморозряду, її електро рушійна сила (ЕРС, ступінь зарядженості) поступово знижується, навіть за повної відсутності навантаження. Для забезпечення періодичного заряду (підзаряду) використовуються стаціонарні або переносні суднові зарядні пристрої. Таким чином, необхідно не рідше одного разу на місяць виконувати підзаряд батареї. Якщо ж виконувались перевірочні чи робочі пуски двигуна, то заряд (підзаряд) виконується щоразу після їх проведення.

У випадку залишення судна, час перебування людей у рятувальній шлюпці може становити від кількох годин до 2-3 діб. Тривалість цього часу залежить від багатьох факторів: погодних умов, стану засобів зв'язку, передачі даних позиції та координаті рятувальних заходів. Для забезпечення роботи засобів зв'язку, сигналізації та життєдіяльності людей використовується живлення від акумуляторних батарей [3, с. 80]. Однак слід враховувати, що акумуляторні батареї є стартерними та забезпечують пуск двигуна, робота якого необхідна для надання шлюпці руху, особливо необхідного у штормову погоду. Заряд батарей можливий тільки від передбаченого і існуючого «навісного» генератора двигуна. При цьому двигун повинен бути у роботі. Це зумовлює додаткову витрату палива, яке так необхідне для забезпечення виживання. Крім того, створюються не зовсім сприятливі умови для людей, що перебувають на борту шлюпки.

Шляхом вирішення цієї проблеми може стати додаткове встановлення сонячної батареї, що забезпечує автономне енергопостачання шлюпки та постійний заряд шлюпкових акумуляторних батарей у світлий час доби.

Сонячна енергія має кілька технічних переваг, які роблять її унікально придатною для морських застосувань. Завдяки рясній сонячній енергії на воді, сонячна енергія забезпечує стабільну зарядку протягом дня, зменшує використання генератора, скорочує витрати палива та підтримує заряд акумуляторної батареї без додаткового шуму, обслуговування та ризиків, пов'язаних з легкозаймистим паливом. Сонячна енергія не спричиняє жодних викидів, тобто є екологічно-безпечною. Крім того, на відміну від звичайних морських енергетичних установок, сонячні енергетичні системи працюють безшумно, що є важливим фактором. Нарешті, сонячні енергетичні системи можуть виступати ідеальним джерелом енергії, незалежним від електромеханічних систем судна [1, с. 75].

Серед основних типів сонячних панелей, найбільш ефективними для використання в морських умовах є панелі 2-х типів :

- жорсткі монокристалічні панелі : міцні та ефективні; ідеально підходять для кріплення на рейках, шлюпбалках або арках. Вони мають міцний скляний корпус і добре витримують вплив солоної води;

- напівгнучкі панелі : легкі та злегка гнучкі – ідеально підходять для монтажу на зовнішніх поверхнях, але по них не слід ходити. Ці панелі покриті полімером, який не такий міцний і довговічний, але все одно служить до 10 років.

Стандартні з'єднання типу MC4 на панелях підходять для морського

середовища. Але, як і з будь-яким обладнанням для морської води, потрібно пам'ятати про біметалеву корозію монтажних елементів. При виборі сонячних панелей для рятувальних шлюпок важливо враховувати декілька ключових характеристик, щоб система працювала ефективно та довго.

Потужність сонячних панелей визначається потребами енергії, які мають покриватися системою. Розмір панелі залежить від того, які пристрої та системи на борту потребують живлення. Для рятувальних шлюпок достатньо панелів потужністю від 100 до 300 Вт.

Для рятувальної шлюпки раціональніше і краще обрати полікристалічні або монокристалічні сонячні панелі. Монокристалічні зазвичай більш ефективні і займають менше місця за тієї ж потужності, що робить їх хорошим вибором при обмеженому просторі. Полікристалічні, хоч і менш ефективні, можуть бути вигіднішими за вартістю і підійдуть для шлюпки з великою площею для встановлення панелей. Обмежений простір та необхідність обліку ваги – важливі фактори при встановленні. Важливо вибирати моделі, які не тільки ефективно генерують енергію, але й підходять за розмірами та вагою для конкретної шлюпки. Компактні та легкі пристрої дозволяють легко інтегрувати їх у існуючу конструкцію, не додаючи зайвого навантаження на конструкцію шлюпки. Оскільки панелі будуть експлуатуватися в суворих морських умовах, вони мають бути стійкими до впливу вологи, солі та сильних вітрів. Це означає, що панелі повинні мати високий рівень захисту від корозії та бути водонепроникними. Необхідно звернути увагу на моделі з антикорозійними покриттями та захистом від зовнішніх пошкоджень.

Процес встановлення та обслуговування сонячної батареї на типову

рятувальну шлюпку не дуже складний, але потребує відповідну кваліфікацію виконавців робіт і, як модернізція, повинен бути погоджений із судновласником та інспекцією міжнародного морського класифікаційного товариства (Регістра судноплавства). Процес установки вимагає врахування безлічі факторів, включаючи розташування панелі, її надійне кріплення та підключення до електричних систем на борту шлюпки. Панель необхідно монтувати на верхній зовнішній частині корпусу шлюпки, оскільки це місце забезпечує максимальне сонячне освітлення.

Перед встановленням важливо оцінити можливі перешкоди, такі як щогли, балки або інші елементи, які можуть затінювати панелі та знижувати їхню ефективність. Крім того, правильне підключення сонячних панелі до електричної системи шлюпки є важливим для забезпечення ефективної роботи всієї системи. Після встановлення важливо стежити за станом пристроїв. Регулярне очищення від солі, пилу та інших забруднювачів допоможе зберегти високу ефективність панелей протягом багатьох років. Також слід періодично перевіряти з'єднання та стежити за станом акумуляторів, щоб уникнути їх зайвого розряду або пошкодження. На рис. 2 показано підключення сонячної батареї до існуючої електросхеми типової рятувальної шлюпки [4].

Модернізація енергосистеми шлюпки із застосуванням сонячної панелі передбачає монтаж і додаткове підключення до існуючої електросхеми лише сонячної панелі і контролера. Всі інші елементи схеми залишаються без змін.

Червоними стрілками позначен напрямок руху струму від сонячної батареї (1) до контролера (2) і далі до акумуляторної батареї (4 або 5). Залежно від положення перемикача (6) є можливість підключати першу, другу або дві разом акумуляторні батареї для заряду. Ємність кожної батареї типової рятувальної шлюпки становить ≈ 70 Ah (Ампер-год). Таким чином, необхідний номінальний зарядний струм буде становити 4-5А для розглядуємої схеми. Час зарядки може варіюватися від 4 до 16 годин сонячного світла для однієї батареї, залежно від площі поверхні та умов освітлення. Сонячна енергія може бути розрахована відповідно до географічного положення, площі сонячних панелей та ефективності сонячних панелей [1, с.76].

Пропонується тонкий і легкий сонячний модуль MARE FLEX 120, який забезпечує максимальну потужність 120 Вт, є гнучким і ідеально підходить для встановлення на рятувальній шлюпці (рис. 3).

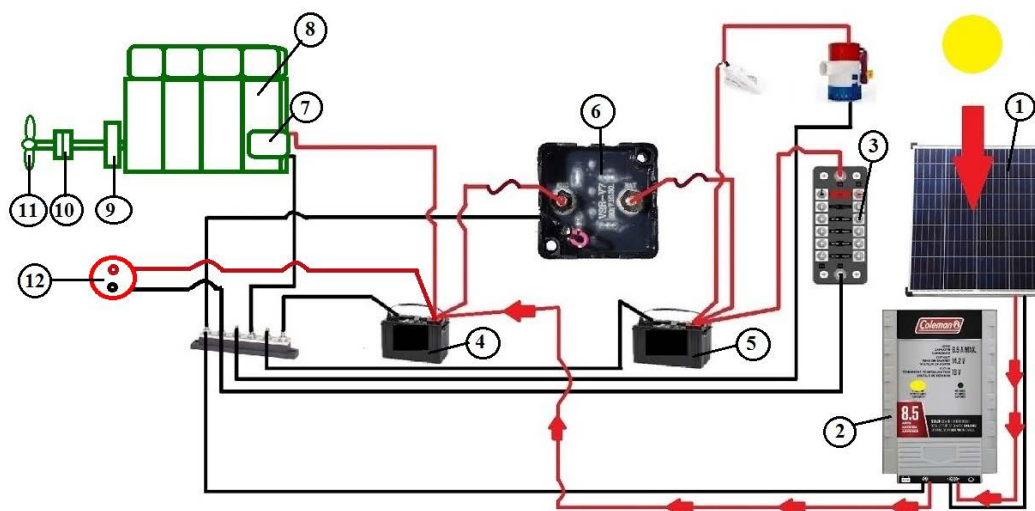


Рис. 2. Підключення сонячної батареї до існуючої електричної схеми типової рятувальної шлюпки, де: 1-сонячна панель; 2-контролер (зарядний пристрій); 3-пульт управління двигуном; 4, 5– шлюпкові акумуляторні батареї; 6-перемикач акумуляторних батарей; 7-електростартер двигуна; 8-дизельний двигун; 9-маховик; 10-муфта; 11-гребний гвинт; 12-розетка для підключення зовнішнього зарядного пристрою

Передня та задня поверхня виготовлені з ETFE та є стійкими до атмосферних впливів, але надзвичайно прозорими [5].

Основні технічні дані :

- Максимальна напруга живлення – 19,1В;
- Максимальний струм – 6.29А;
- Напруга холостого ходу – 22,0В;
- Струм короткого замикання – 6,70А;
- Сонячні елементи – моноклітина.

Модуль особливо легко встановлюється: його можна закріпити за допомогою вологостійких будівельних клеїв (мастик), високотемпературного сілікону (High temperature silicone) або за допомогою вбудованих люверсів з нержавіючої сталі. Сонячний модуль постачається з 5-метровим з'єднувальним кабелем з кабельними головками 2 x 2,5 мм².

* *Короткий орієнтир: приблизно 180 Вт сонячної енергії на кожні 100 Ампер-год ємності акумулятора, за умови приблизно чотирьох годин ефективного сонячного світла на день.*

Висновки. Використання сонячних панелей на морських рятувальних шлюпках забезпечує надійне і незалежне від роботи двигуна електроживлення споживачів шлюпки включно заряд акумуляторних батарей. Забезпечує суттєву економію палива при знаходженні шлюпки в морі. У результаті сприяє підвищенню безпеки мореплавства, підвищенню рівня безпеки та порятунку людей на морі, які ґрунтуються на міжнародних морських конвенціях.



Рис. 3. Сонячний модуль MARE FLEX 120 / 120 Вт / Напівгнучкий /, 1190 x 540 x 4 мм



Рис. 4. Зовнішній вигляд рятувальної шлюпки дообладнаної сонячною панеллю

Наявність і використання сонячних панелей на рятувальних шлюпках є не тільки зручним і економічним рішенням для автономного живлення шлюпок

при знаходженні в морі але й забезпечує постійний підзаряд акумуляторних батарей при знаходженні шлюпки у звичайних умовах на борту судна.

Список літератури:

1. Гончарук І.П., Никифоров Ю.О., Кошарська Л.В. Особливості впливу відновлюваної енергетики на ефективність і екологічність морського транспорту. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ: 2023. Випуск 2 (38). С.73-78. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38>
2. Окулов В.І., Щенявський Г.С. Охорона і безпека на морі (Частина 2). Конспект лекцій. Одеса: Видавничтво Одеського національного морського університету, 2021. 102 с.
3. Регістр судноплавства України. Правила щодо обладнання морських суден. Київ, 2026. 438 с.
4. PWM Solar Charge Controller. URL: <https://www.pinterest.com/pin/pwm-solar-charge-controller-working-sizing-and-selection--5629568279431161/>
5. Сонячний модуль PHAESUN MARE FLEX 120 / 120 Вт / Напівгнучкий. URL: <https://www.svb24.com/en/phaesun-mare-flex-120-solar-module-120-w-semi-flexible-1190-x-540-x-4-mm.html>

Yesyev A.I. MODERNIZATION OF LIFEBOATS USING SOLAR PANELS

The article considers the purpose, arrangement and requirements of the current international conventions and societies for collective life-saving appliances of sea vessels, the main of which are lifeboats. Lifeboats of sea vessels must ensure the preservation of the lives of people in distress from the moment they leave the vessel.

The equipment and technical condition of the boats must comply with a number of requirements: the Rules for the Equipment of Sea-going Vessels (2026, including amendments and supplements) and taking into account amendments to applicable international conventions and codes adopted by relevant resolutions of the International Maritime Organization (IMO), the unified requirements and recommendations of the International Association of Classification Societies (IACS) and amendments to applicable resolutions of the United Nations Economic Commission for Europe and directives of the European Parliament and the Council, amendments and supplements adopted based on the results of the analysis of the Rules of other Classification Societies, as well as the experience of their application. The device and analysis of the operation of the propulsion system of a marine lifeboat with a traditional power supply system are described. The development, modern technologies and use of solar panels are considered. The analysis of the latest technical solutions and experience is carried out, which shows the growing interest in alternative sources of electricity in maritime transport. The most common source of alternative energy is solar energy obtained using solar panels. Consideration of the use of solar energy systems on board ships indicates that there are some factors that can affect this use. These factors include: the presence of high solar radiation during the ship's voyage, the presence of sufficient deck area open to the sun, the presence of an appropriate photovoltaic system connected to the network, the calculation and technical and economic selection of available solar panels. The main types of modern solar panels and their manufacturing technologies are considered. An option for modernizing a lifeboat using a solar panel to provide battery charging is proposed. Practical recommendations are provided regarding the progress and performance of work related to the modernization of existing lifeboats of seagoing vessels.

Keywords: lifeboat, battery, solar panel, current, voltage, engine.

Дата першого надходження статті до видання: 13.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Жук М.М.

<https://orcid.org/0000-0003-1989-1053>

Національний університет «Львівська політехніка»

Півторак Г.В.

<https://orcid.org/0000-0003-3645-1586>

Національний університет «Львівська політехніка»

Скиба М.Б.

<https://orcid.org/0009-0004-9057-2770>

Національний університет «Львівська політехніка»

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ ПОПИТУ НА ПЕРЕМІЩЕННЯ З МЕТОЮ ПОКУПОК (НА ПРИКЛАДІ ЛЬВОВА)

У статті досліджено просторово-часові закономірності переміщень населення з метою здійснення покупок як важливої складової міської мобільності. Актуальність роботи зумовлена зростанням транспортного навантаження у містах та необхідністю врахування поведінкових аспектів формування попиту на переміщення. Метою дослідження є аналіз розподілу переміщень за покупками протягом доби з урахуванням соціально-демографічних та просторових характеристик.

Емпіричною базою дослідження стали результати опитування 480 респондентів. У роботі проаналізовано інтенсивність переміщень у різні періоди доби, структуру місць здійснення покупок, а також вплив соціально-демографічних чинників на часові параметри поведінки споживачів.

Встановлено, що найвища інтенсивність переміщень припадає на післяобідній період (15:00–18:00), тоді як у ранкові години активність є меншою. Виявлено чітку залежність між часом доби та місцем здійснення покупок. Зокрема, у ранковий період переважають покупки у магазинах, розташованих у межах пішохідної доступності, що зумовлено прагненням мінімізувати часові витрати. У другій половині дня зростає частка відвідувань торгових центрів, які виконують функцію комплексного обслуговування та сприяють здійсненню змішаних покупок. У вечірній період знову посилюється роль локальних торгових об'єктів. Дослідження також показало зміну структури покупок протягом дня – від переважно продовольчих у першій половині дня до змішаних у другій.

Проаналізовано вплив соціально-демографічних характеристик (зайнятості, розміру домогосподарства та наявності автомобіля) на вибір часу здійснення покупок. Виявлено, що ці чинники впливають на поведінку населення при переміщенні з метою покупок.

Отримані результати мають практичне значення для вдосконалення транспортного планування, моделювання попиту та розвитку ефективної міської логістики.

Ключові слова: транспортний попит, купівельна поведінка, часовий розподіл переміщень, соціально-демографічні чинники, міські переміщення.

Постановка проблеми. Переміщення населення за покупками є важливою складовою структури міської мобільності та формування транспортного попиту. Вони належать до категорії так званих вільних переміщень і, на відміну від трудових переміщень, характеризуються більшою часовою гнучкістю та варіативністю [1, 2]. Водночас, як показують дослідження, саме ці поїздки формують значну частку загальної кількості щоденних переміщень і суттєво впливають на навантаження

транспортної системи [3]. Особливістю переміщень за покупками є їх виражена залежність від індивідуальних характеристик населення та умов міського середовища, що зумовлює нерівномірність їх розподілу протягом доби. Зокрема, час здійснення покупок та вибір місця їх виконання формуються під впливом соціально-демографічних чинників, режиму зайнятості населення та просторової доступності торгових об'єктів. У зв'язку з цим актуальним є дослідження про-

сторово-часових закономірностей переміщень за покупками та параметрів, що їх визначають.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Часовий розподіл переміщень за покупками має специфічний характер, відмінний від класичних пікових трудових переміщень. Зокрема, дослідження вибору часу відправлення для поїздок з метою покупок показують, що такі переміщення формуються як результат одночасного вибору виду транспорту та часу поїздки, що потребує використання ієрархічних моделей [4]. Це підтверджує, що часовий аспект не є вторинним, а виступає самостійним елементом поведінкового вибору.

Емпіричні дослідження також демонструють наявність виражених добових шаблонів поведінки. За дослідженнями, викладеними в праці [5], для літніх людей найбільша інтенсивність переміщень з метою покупок припадає на дообідній період (10:00–11:00). Крім того, встановлено, що у вихідні дні активність покупців є більш розтягнутою у часі, що свідчить про менший вплив часових обмежень.

Важливим чинником формування часового розподілу є також ланцюжки поїздок, коли покупки інтегруються в інші активності. Як показують узагальнюючі огляди, значна частина переміщень за покупками здійснюється як додаткова активність у межах більш складних щоденних маршрутів [6]. Це означає, що час здійснення покупок часто визначається не самою потребою у купівлі, а структурою щоденної активності індивіда [7].

Соціально-демографічні характеристики є ключовими детермінантами як частоти, так і часових параметрів переміщень за покупками [8]. У сучасних дослідженнях також підкреслюється, що вплив соціально-демографічних чинників є неоднорідним і може змінюватися залежно від контексту (наприклад, рівня урбанізації або розвитку електронної комерції) [9]. На основі досліджень, поданих в праці [10], автори виділяють чотири класи покупців (обмежені в часі; ті, які використовують два канали для виконання покупок; традиційні; ті, які нечасто здійснюють покупки), що відрізняються за соціально-демографічними характеристиками.

У роботах, присвячених аналізу доступності торгових об'єктів, показано, що середній час доїзду до магазинів значною мірою залежить від їх просторової концентрації та типу (локальні магазини, торгові центри тощо). Наприклад, дослідження доступності демонструє, що більшість поїздок до торгових об'єктів концентрується в інтервалі 20–40 хвилин, причому час

суттєво зростає із віддаленням від міського центру [11]. Тип торгового об'єкта впливає не лише на час поїздки, а й на поведінку після прибуття. Зокрема, встановлено, що більший час доїзду до торгового центру асоціюється з довшим перебуванням у ньому та поєднанням покупок з дозвіллям [12]. Це свідчить про існування взаємозв'язку між просторовою доступністю та часовою структурою активності.

Крім того, у дослідженнях концепції «15-хвилинного міста» показано, що доступність локальних сервісів безпосередньо впливає на тривалість і частоту поїздок за покупками: чим ближче розташовані торгові об'єкти, тим менший час витрачається на переміщення [13]. Це підкреслює важливість врахування просторових чинників у дослідженні часових характеристик поїздок. Дослідження [14] показало, що вибір способу переміщення за покупками залежить від часу доби: вранці переважають піші прогулянки, тоді як у другій половині дня зростає частка поїздок на автомобілях та громадському транспорті.

У сучасних дослідженнях переміщень з метою покупок сформувалося два ключові підходи до збору емпіричних даних, що визначають подальший інструментарій аналізу. Перший підхід базується на використанні опитувань домогосподарств, які забезпечують детальну інформацію про поведінку індивідів, включаючи мету поїздки, часові характеристики, вибір виду транспорту та соціально-економічні параметри [15]. Другий підхід пов'язаний із застосуванням пасивно зібраних великих даних, що формуються на основі цифрових слідів користувачів – зокрема, даних смартфонів громадського транспорту, GPS-трекінгу, мобільних пристроїв тощо [16, 17]. Якщо перший підхід дозволяє безпосередньо інтерпретувати мотивацію поведінки, то другий забезпечує масштабність та високу часову деталізацію, хоча й потребує додаткових методів для ідентифікації цілей поїздок.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз розподілу переміщень за покупками протягом доби з урахуванням соціально-демографічних та просторових характеристик, що дозволить підвищити точність моделювання транспортного попиту та обґрунтувати ефективні рішення у сфері міської логістики. Дослідження проведено на основі результатів опитувань населення Львова.

Виклад основного матеріалу.

Загальна структура вибірки опитаних

Подальший аналіз зроблено на основі результатів опитувань 480 респондентів. В структурі

вибірки 63% становлять жінки. Працюючі респонденти становлять 39% вибірки, 54% – студенти. Щодо розміру домогосподарства розподіл такий: 11,9% живуть самі, 19,2% є членами домогосподарств, що складаються з двох осіб, 21,7% – з трьох осіб, 26% – з чотирьох осіб і 21,2% – з 5 і більше осіб. 57,7% домогосподарств мають у власності автомобіль.

Аналіз отриманих результатів

Отримані результати опитувань слугують основою для подальшого аналізу поведінкових характеристик респондентів у процесі здійснення покупок. На рис. 1 подано розподіл денної кількості переміщень за покупками залежно від часу та місця виконання покупки.

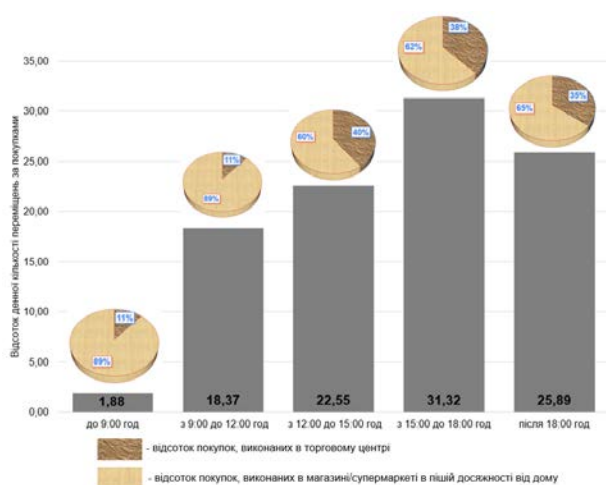


Рис. 1. Розподіл денної кількості переміщень за покупками залежно від часу та місця виконання покупки

Найменша інтенсивність переміщень спостерігається у ранковий період до 9:00 (1,88%), після чого відбувається різке зростання активності у проміжку з 9:00 до 12:00 (18,37%). У подальшому інтенсивність переміщень продовжує зростати, досягаючи значень 22,55% у період з 12:00 до 15:00. Максимальне значення кількості переміщень за покупками припадає на часовий інтервал 15:00–18:00 (31,32%), що свідчить про концентрацію виконання покупок у післяробочий період. Після 18:00 спостерігається незначне зниження інтенсивності (до 25,89%), однак рівень активності залишається відносно високим.

Додатковий аналіз структури місць здійснення покупок показує відмінності залежно від часу доби. У ранкові години переважають покупки у магазинах біля дому (89%), що пояснюється прагненням мінімізувати витрати часу. У денний період (12:00–18:00) частка покупок в торговельних центрах зростає, тоді як після 18:00 знову спосте-

рігається зростання ролі локальних магазинів (до 65%). Це свідчить про зміну поведінкових шаблонів: протягом дня покупки частіше поєднуються з іншими видами діяльності, тоді як у ранковий та вечірній час переважають швидкі та цілеспрямовані покупки поблизу місця проживання.

Оскільки тільки 9 осіб серед опитаних вказали, що їх остання офлайн-покупка була виконана в ранковий період (до 9:00 год), в подальшому аналізі цей період дня не розглядається.

Для оцінки наявності впливу соціо-демографічних та соціо-економічних характеристик населення на час виконання ними покупок проведено обчислення, результати яких відображено на рис. 2.

На основі проведеного аналізу можна сформувати «портрет» покупця, що виконує покупку в певний період часу:

– Період з 09:00 до 12:00 год. В цей період спостерігається найбільша частка жінок серед покупців та найменша частка покупців, які мають власний автомобіль у домогосподарстві. Частка працюючих та розмір домогосподарства більші за середні значення загальної вибірки опитаних.

– Період з 12:00 до 15:00 год. Серед покупців цього періоду спостерігається найбільший середній розмір домогосподарства. Решта показників найближчі серед всіх часових періодів до середніх значень вибірки.

– Період з 15:00 до 18:00 год. В цей період спостерігається також суттєва частка жінок серед покупців та найменша частка працюючих покупців. Частка покупців з власним автомобілем у домогосподарстві нижча за середнє значення вибірки.

– Період після 18:00 год. Серед покупців цього періоду спостерігається найменше жінок та найменший середній розмір домогосподарства. Водночас, тут найбільше, порівняно з іншими часовими періодами, працюючого населення та власників автомобіля.

Дані для оцінки внутрішньої структури покупок в межах кожного часового періоду подано в табл. 1 та на рис. 3.

Аналіз розподілу покупок за часовими періодами доби та місцем їх здійснення дозволяє виявити чітко виражені закономірності поведінки споживачів. Загалом у структурі попиту переважають змішані покупки, що свідчить про прагнення населення поєднувати придбання продовольчих і непродовольчих товарів в межах одного відвідування торговельного об'єкта.

Часовий аспект демонструє суттєву диференціацію характеру покупок. У ранковий період (9:00–12:00) домінують продовольчі покупки, тоді як частка непродовольчих є мінімальною. Це вказує на переважно цільовий характер ранкових

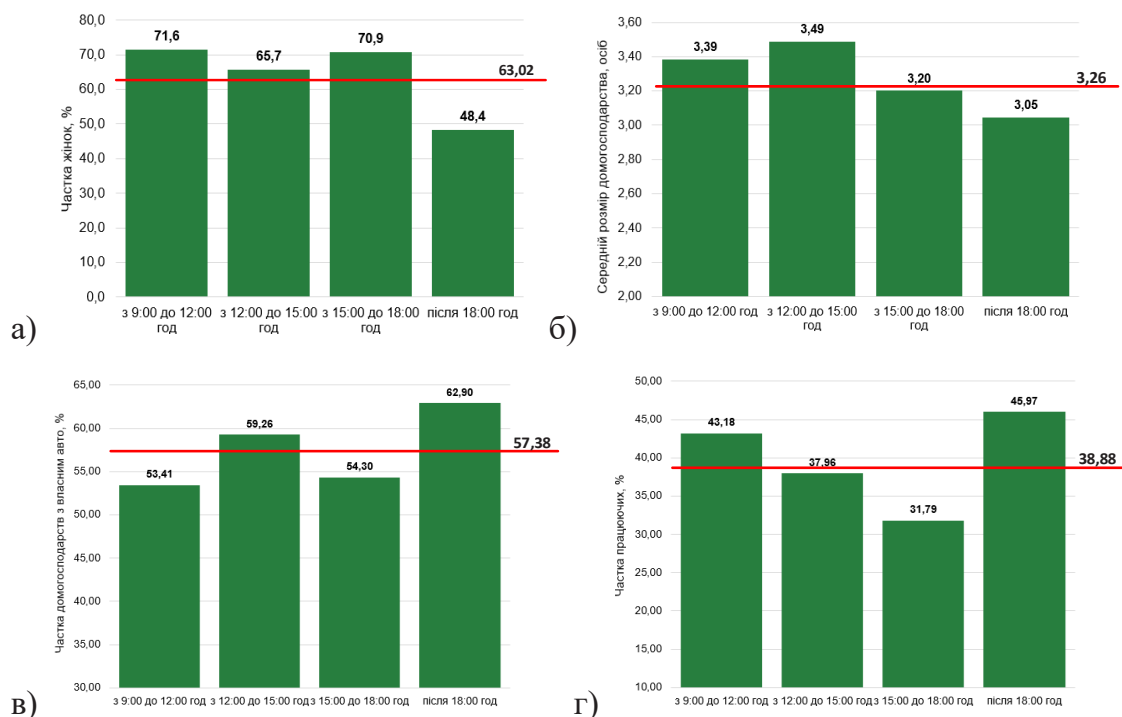


Рис. 2. Частка покупців певної соціо-демографічної групи, які виконують покупки у визначений період дня: а) стать; б) розмір домогосподарства; в) наявність автомобіля в домогосподарстві; г) вид зайнятості

Таблиця 1

Кількість покупок кожного виду товару та їх відсоткове співвідношення з розподілом за часовими періодами

Вид покупки		Часовий період				Всього
		з 9:00 до 12:00 год	з 12:00 до 15:00 год	з 15:00 до 18:00 год	після 18:00 год	
Загальна вибірка	продовольчі товари	45	43	58	51	197
	непродовольчі товари	6	18	14	15	53
	змішана покупка	37	47	79	58	221
З них виконані в ТЦ	продовольчі товари	3	7	20	9	39
	непродовольчі товари	2	10	9	10	31
	змішана покупка	5	26	28	25	84
З них виконані в магазині/супермаркеті в межах пішої досяжності	продовольчі товари	42	36	38	42	158
	непродовольчі товари	4	8	5	5	22
	змішана покупка	32	21	51	33	137

переміщень, пов'язаних із задоволенням базових щоденних потреб. У період з 12:00 до 15:00 спостерігається зростання частки змішаних і непродовольчих покупок, що свідчить про поступовий перехід до більш комплексної моделі споживчої поведінки. Найвищий рівень активності припадає на часовий інтервал 15:00–18:00, для якого характерне максимальне зростання змішаних покупок, що підтверджує формування пікового навантаження на торговельну та транспортну інфраструктуру в другій половині дня. У вечірній період (після 18:00) зберігається висока частка як

змішаних, так і продовольчих покупок, що може бути пов'язано як із завершальними закупівлями після робочого дня, так і з реалізацією відкладеного попиту.

Просторовий аналіз показує відмінності у структурі покупок залежно від місця їх здійснення. У торгових центрах переважають змішані покупки, частка яких є найбільшою серед усіх типів, що вказує на їхню функціональну роль як осередків комплексного обслуговування населення. Активність у таких об'єктах зростає у другій половині дня, зокрема у період 15:00–18:00 та після 18:00,

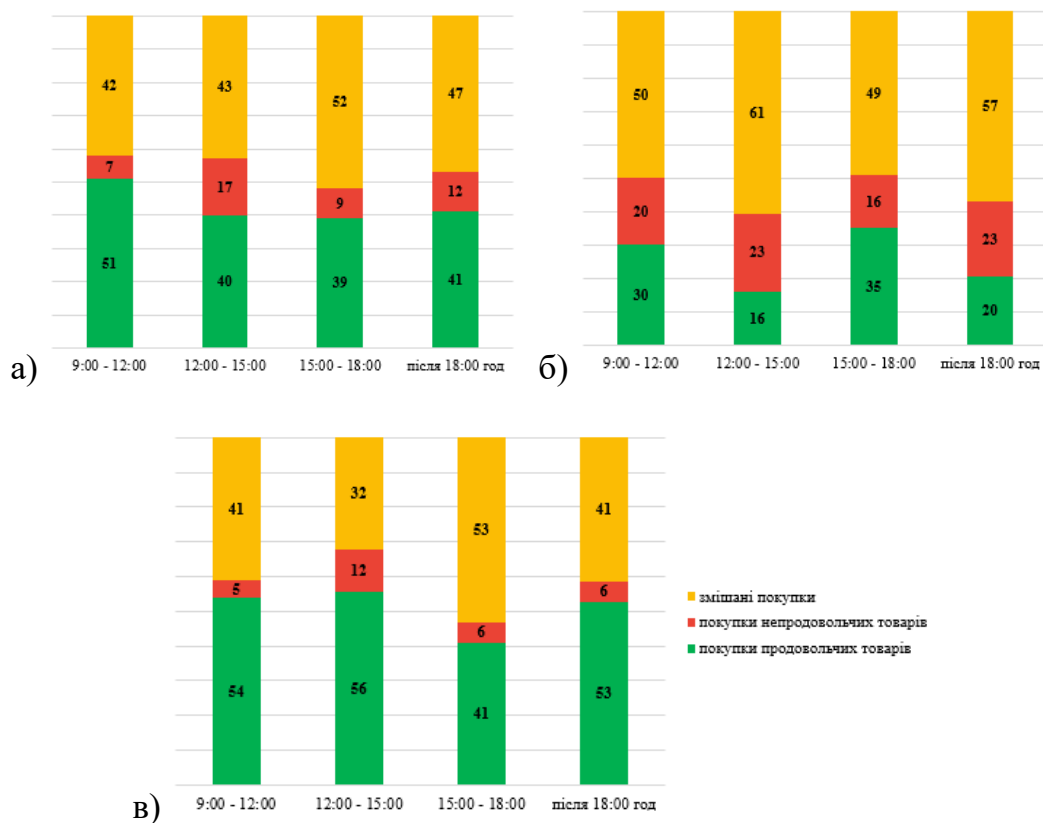


Рис. 3. Розподіл покупок за видами протягом дня: а) загалом; б) окремо для покупок, виконаних в ТЦ; в) окремо для покупок, виконаних в магазині/супермаркеті в межах пішої досяжності

що узгоджується із загальною тенденцією до здійснення комбінованих покупок після завершення робочого часу.

Натомість у магазинах, розташованих у межах пішої доступності, домінують продовольчі покупки, які мають більш рівномірний розподіл протягом дня з незначним просіданням в пообідній період. Це свідчить про їхню орієнтацію на забезпечення повсякденних потреб населення та виконання функції «магазинів біля дому». Частка непродовольчих покупок у таких об'єктах є незначною, що додатково підтверджує їх спеціалізацію.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено наявність чітко виражених просторово-часових закономірностей переміщень населення з метою здійснення покупок, що формують специфічну структуру міської мобільності та відрізняються від класичних трудових поїздок. Виявлено, що розподіл інтенсивності переміщень протягом доби є нерівномірним із формуванням пікового навантаження у післяобідній період (15:00 – 18:00), що свідчить про концентрацію відповідного виду активності після завершення основного робочого часу.

Доведено наявність стійкого взаємозв'язку між часом доби та просторовими характеристиками

здійснення покупок. Зокрема, у ранковий та вечірній періоди переважають об'єкти пішої доступності, тоді як у денні години зростає роль торгових центрів як багатофункціональних осередків обслуговування. Встановлено, що тип покупок також зазнає суттєвих змін у часовому розрізі: від домінування продовольчих у першій половині дня до зростання частки змішаних покупок у другій.

Соціально-демографічні характеристики також впливають на формування часових параметрів переміщень. Зокрема, у вечірній період зростає частка покупок, виконаних працюючим населенням та домогосподарствами із наявністю автомобіля, що вказує на інтеграцію покупок у структуру щоденних поїздок. Водночас для денних періодів характерна більша активність студентів та домогосподарств більшого розміру.

Отримані результати поглиблюють уявлення про поведінкові аспекти формування транспортного попиту та можуть бути використані при розробленні моделей транспортного планування, а також для обґрунтування управлінських рішень у сфері міської логістики та організації обслуговування населення.

Список літератури:

1. Shams K., Jin X., Argote J. Examining temporal transferability of trip frequency choice models. *TRB 93rd Annual Meeting Compendium of Papers*. 2014. P. 18.
2. Raux C., Ma T. Y., Cornelis, E. Variability in daily activity-travel patterns: the case of a one-week travel diary. *European transport research review*. 2016. Vol. 8, iss. 4. P. 26. <https://doi.org/10.1007/s12544-016-0213-9>.
3. Exploring resident's daily activity-travel behavior: activity pattern, duration and competition / W. Li et al. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021. Vol. 25, iss. 7. P. 3121–3135. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2013-6>.
4. Bhat C. R. Analysis of travel mode and departure time choice for urban shopping trips. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1998. Vol. 32, iss. 6. P. 361-371. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(98\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(98)00004-6).
5. Fatima K., Moridpour S., Saghapour T. Spatial and temporal distribution of elderly public transport mode preference. *Sustainability*. 2021. Vol. 13(9). P. 4752. <https://doi.org/10.3390/su13094752>.
6. Le H. T., Carrel A. L., Shah H. Impacts of online shopping on travel demand: a systematic review. *Transport Reviews*. 2022. Vol. 42, iss. 3. P. 273-295. <https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1961917>.
7. Inferring temporal motifs for travel pattern analysis using large scale smart card data / D. Lei et al. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020. Vol. 120. P.102810. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102810>.
8. Aldo A. L., Andreas B., Martin L. Exploring the associations between E-shopping and the share of shopping trip frequency and travelled time over total daily travel demand. *Travel Behaviour and Society*. 2023. Vol. 31. P. 202-208. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.11.007>.
9. Kim W., Wang X. C. Shopping trips and deliveries then and now: How the behavioral shift differs by income level and urban size. *Travel Behaviour and Society*. 2024. Vol. 36. P. 100782. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2024.100782>.
10. Shah H., Carrel A. L., Le H. T. What is your shopping travel style? Heterogeneity in US households' online shopping and travel. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2021. Vol. 153. P. 83-98. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.08.013>.
11. Measuring cluster-based spatial access to shopping stores under real-time travel time / J. Qin et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, iss. 4. P. 2310. <https://doi.org/10.3390/su14042310>.
12. Yamada T. The stay coefficient: a novel quantification of the relationship between stay time and travel time for urban shopping behavior analysis. *Geo-spatial Information Science*. 2023. Vol. 26, iss. 1. P. 44-57. <https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2150569>.
13. The 15-minute city quantified using mobility data / T. Abbiasev et al. *National Bureau of Economic Research. NBER Working Paper*. 2022. P. 30752. <https://doi.org/10.3386/w30752>.
14. Pivtorak H., Pruskyi Y. Using cluster analysis to study the characteristics of micro-freight flows of shoppers. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2025. Т. 2(25). С. 68–76. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1911>.
15. Li J., Lo K., Guo M. Do socio-economic characteristics affect travel behavior? A comparative study of low-carbon and non-low-carbon shopping travel in Shenyang City, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15(7). P. 1346. <https://doi.org/10.3390/ijerph15071346>.
16. Detecting and understanding urban changes through decomposing the numbers of visitors' arrivals using human mobility data / T. Maeda et al. *Journal of Big Data*. 2019. Vol. 6, iss. 1. P. 1-25. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0168-5>.
17. Alattar M. A., Cottrill C., Beecroft M. Sources and applications of emerging active travel data: A review of the literature. *Sustainability*. 2021. Vol. 13(13). P. 7006. <https://doi.org/10.3390/su13137006>.

Zhuk M.M., Pivtorak H.M., Skyba M.B. SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF DEMAND FOR SHOPPING TRIPS (CASE STUDY OF LVIV)

The article examines the spatio-temporal patterns of population movements for shopping, as an important component of urban mobility. The relevance of the study is determined by the increasing transport load in cities and the need to consider behavioral aspects in the formation of travel demand. The aim of the research is to analyze the distribution of shopping trips throughout the day, considering socio-demographic and spatial characteristics.

The empirical basis of the study consists of a survey of 480 respondents. The study analyzes the intensity of movements at different times of the day, the structure of shopping locations, and the influence of socio-demographic factors on the temporal parameters of consumer behavior.

It was found that the highest intensity of movements occurs in the afternoon period (15:00–18:00), while activity is lower in the morning hours. A clear relationship was observed between the time of day and the choice of shopping locations. In particular, in the morning period, shopping is dominated by stores within walking distance, driven by the desire to minimize time expenditure. In the afternoon, visits to shopping centers increase, as these locations provide comprehensive services and facilitate mixed shopping activities. In the evening, the role of local retail outlets strengthens again. The study also revealed a change in the structure of purchases throughout the day – from predominantly grocery shopping in the first half of the day to mixed purchases in the second half.

The influence of socio-demographic characteristics (employment status, household size, and car ownership) on the choice of shopping time was analyzed. It was found that these factors significantly affect consumer behavior in shopping-related movements.

The results have practical implications for improving transport planning, modeling travel demand, and developing effective urban logistics.

Keywords: transport demand, consumer behavior, temporal distribution of movements, socio-demographic factors, urban mobility.

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Кириллова В.Ю.

<https://orcid.org/0000-0003-0738-0408>

Одеський національний морський університет

Кириллова О.В.

<https://orcid.org/0000-0002-3414-7364>

Одеський національний морський університет

ТРИАДНА КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ РОЗВИТКУ ПОРТОВИХ СИСТЕМ: SMART PORT, PUBLIC – PRIVATE PARTNERSHIP, PEOPLE – PLANET – PROFIT

Сучасний етап розвитку портової індустрії характеризується глибокими трансформаційними процесами, зумовленими цифровізацією транспортної інфраструктури, еволюцією інституційних моделей управління портами та зростанням ролі принципів сталого розвитку у функціонуванні транспортних систем. У цих умовах порти дедалі більше трансформуються з елементів транспортної інфраструктури у складні організаційно-технологічні системи, інтегровані у глобальні транспортні мережі та системи розподілу матеріальних потоків. Це актуалізує необхідність розроблення інтегрованих теоретичних підходів до аналізу трансформації портових систем.

Метою статті є теоретичне обґрунтування інтегрованого концептуального підходу до аналізу розвитку портових систем на основі формування тріадної моделі їх трансформації. У роботі запропоновано *Triadic Framework for Smart Port Development* – тріадну концептуальну модель розвитку портових систем, яка інтегрує три ключові виміри трансформації портової індустрії: технологічний (концепція *Smart Port*), інституційний (механізми *Public–Private Partnership*) та соціально-еколого-економічний (принципи *People–Planet–Profit*).

У дослідженні узагальнено сучасні наукові підходи до аналізу цифрової трансформації портів, інституційних моделей управління портовою інфраструктурою та концепцій сталого розвитку. Встановлено, що існуючі дослідження характеризуються методологічною фрагментацією, зумовленою ізольованим розглядом технологічних, інституційних та соціально-еколого-економічних аспектів розвитку портових систем. Запропонована модель дозволяє подолати зазначену фрагментацію шляхом інтеграції відповідних вимірів у межах єдиної аналітичної рамки.

Концептуальну модель формалізовано у вигляді функціональної залежності розвитку портової системи від рівня технологічної трансформації, ефективності інституційних механізмів та відповідності принципам сталого розвитку. Показано, що їх взаємодія формує інтегровану систему розвитку портових систем у сучасних умовах цифрової трансформації.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості його використання як аналітичного інструменту для оцінювання стратегій розвитку портів, аналізу інфраструктурних проєктів та обґрунтування управлінських рішень у сфері модернізації портової інфраструктури. Зокрема, *Triadic Framework for Smart Port Development* може застосовуватися для комплексного аналізу альтернативних моделей розвитку портових систем, включаючи проєкти державно-приватного партнерства та концесійного розвитку.

Ключові слова: транспортні системи, транспортні технології, водний транспорт, портові системи, *Smart Port*, державно-приватне партнерство, концесія, сталий розвиток, цифрова трансформація портів, портова інфраструктура.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку портової індустрії характеризується глибокими трансформаційними процесами, пов'язаними з цифровізацією транспортної інфраструктури, еволюцією моделей управління портами та зрос-

танням ролі інтегрованих транспортних систем у глобальній економіці. У цих умовах порти перестають розглядатися виключно як локальні транспортні вузли та дедалі більше трансформуються у багатфункціональні транспортно-розподільні

центри і портово-промислові комплекси, що інтегрують технологічні, виробничі та сервісні функції. Вони виступають як складні організаційно-технологічні системи, інтегровані у міжнародні транспортні мережі та глобальні системи розподілу матеріальних потоків.

Одним із ключових напрямів трансформації портової діяльності є реалізація концепції *Smart Port*, яка передбачає використання цифрових технологій, систем управління даними, автоматизації портових процесів і платформної інтеграції учасників транспортного процесу. Впровадження технологій Internet of Things, штучного інтелекту, цифрових платформ та аналітики великих даних трансформує логіку функціонування портів, забезпечуючи підвищення ефективності управління, прозорості операцій та інтеграції портів у сучасні транспортні системи.

Паралельно з технологічною трансформацією відбувається еволюція інституційних моделей управління портами, пов'язана з поширенням механізмів державно-приватного партнерства (*Public – Private Partnership, PPP*). У сучасних умовах PPP-моделі виступають ключовим інституційним механізмом модернізації портової інфраструктури, забезпечуючи залучення інвестицій, розвиток терміналів та підвищення ефективності управління портовими активами. Особливого значення набувають концесійні моделі, які формують інституційну основу реалізації інфраструктурних проєктів і забезпечують баланс між державними інтересами та ефективністю приватного управління [8, с. 295-301].

Попри значну кількість досліджень, присвячених цифровізації портів і використанню механізмів державно-приватного партнерства, у сучасній науковій літературі ці напрями здебільшого розглядаються ізольовано. Технологічні аспекти розвитку портових систем аналізуються у межах концепції *Smart Port*, тоді як інституційні механізми – у межах теорії державно-приватного партнерства. Така диференціація підходів зумовлює фрагментарність наукового аналізу процесів трансформації портової індустрії.

Водночас практичний досвід розвитку портових систем свідчить, що технологічні рішення, інституційні моделі управління та стратегічні підходи до розвитку портів формують єдину взаємопов'язану систему, ефективність якої визначається ступенем узгодженості цих компонентів.

Додаткову складність у дослідженні портових систем створює варіативність їх організаційно-функціональних ролей. Порти та портові

термінали можуть функціонувати як елементи транспортних систем або інтегруватися у структуру виробничих і торговельних підприємств, виступаючи складовими їхніх операційних систем [3, с. 234-242]. Це обумовлює суттєву диференціацію технологічних рішень, інституційних моделей управління та стратегій розвитку, яка у більшості досліджень не отримує належного теоретичного узагальнення.

Попри значний обсяг наукових праць, присвячених окремим аспектам цифровізації портів, інституційним механізмам розвитку портової інфраструктури та питанням сталого розвитку, у сучасній науковій літературі відсутній інтегрований теоретичний підхід, який дозволяє розглядати ці процеси як взаємопов'язані складові трансформації портових систем. Унаслідок цього не сформовано концептуальних моделей, здатних інтегрувати технологічні, інституційні та соціально-еколого-економічні аспекти розвитку портових систем у межах єдиної аналітичної рамки.

У зв'язку з цим виникає потреба у формуванні інтегрованого теоретичного підходу, який забезпечує системне поєднання технологічних, інституційних та організаційно-функціональних аспектів розвитку портів.

Саме таким підходом у даному дослідженні виступає інтегрована концептуальна модель *Smart Port – PPP – Sustainable Development*, яка формує основу для комплексного аналізу трансформації портових систем у сучасних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній транспортній науці проблематика розвитку портових систем дедалі частіше розглядається крізь призму цифрової трансформації транспортної інфраструктури та інтеграції портів у глобальні транспортні й виробничі системи. У наукових дослідженнях порти трактуються як складні інфраструктурні вузли, що забезпечують взаємодію різних видів транспорту, формують вузлові елементи міжнародних транспортних коридорів та виконують функції інтеграційних центрів глобальних транспортних мереж [1, с. 85-94].

У цьому контексті дослідники приділяють значну увагу взаємозв'язку розвитку портів із розвитком портових міст і регіонів. Порти розглядаються не лише як елементи транспортної інфраструктури, але і як ключові компоненти просторової організації економічних систем, що впливають на формування виробничих кластерів, регіональних транспортних вузлів та просторових систем взаємодії порту з його хінтерлендом і форлендом [16, с. 311-331].

Розвиток цієї проблематики відображено також у дослідженнях просторової еволюції портів систем. Зокрема, у роботах Т. Notteboom та J.-P. Rodrigue показано, що трансформація портів супроводжується процесами регіоналізації портів систем, у межах яких формуються нові моделі взаємодії портів із внутрішніми транспортними коридорами, а також із системами хінтерленду, що забезпечують інтеграцію портів у глобальні транспортні мережі [8, с. 297-313].

Поряд із дослідженнями просторової еволюції портів систем активно розвивається напрям, пов'язаний із цифровою трансформацією портів діяльності. У цьому контексті сформувалася концепція *Smart Port*, яка розглядається як результат впровадження технологій Industry 4.0 у портову індустрію. У науковій літературі *Smart Port* трактується як інтегрована система управління портовою діяльністю, що базується на використанні інформаційно-комунікаційних технологій, автоматизації портів процесів, цифрових платформ взаємодії учасників транспортного процесу та аналітики великих даних. У дослідженні L. Neilig та S. Voß підкреслюється, що цифрова трансформація портів передбачає інтеграцію інформаційних систем управління, платформ обміну даними між учасниками транспортного процесу та інструментів аналізу даних, що дозволяє підвищити ефективність портів операцій і якість управлінських рішень [10, с. 843-858].

Подальший розвиток цього підходу представлено у роботі A. Molavi, G.J. Lim та B. Race, де запропоновано концептуальну модель формування *Smart Port Index*, що дозволяє оцінювати рівень цифрової зрілості портів систем. У дослідженні визначено ключові технологічні компоненти цифрової трансформації портів, серед яких Internet of Things, системи управління даними та інтегровані цифрові платформи управління портовою діяльністю [11, с. 686-700].

Питання цифровізації транспортних систем у ширшому контексті розглядаються також у роботах М. Ассіаго та співавторів, де показано, що цифровізація контейнерного судноплавства та портів операцій виступає одним із ключових факторів трансформації сучасних транспортних систем і формування нових моделей взаємодії учасників глобальних транспортних мереж [15, с. 1-26].

Значна увага у наукових дослідженнях приділяється також оцінюванню впливу цифрових технологій на ефективність функціонування портів систем. Зокрема, у роботі G.S. Dwarakish та

А.М. Salim показано, що використання сучасних інформаційних технологій у портовій діяльності дозволяє підвищити ефективність використання портової інфраструктури, оптимізувати управління вантажними потоками та скоротити час обробки суден у портах [13, с. 13-23].

У свою чергу, F. Parola, C. Ferrari та A. Tei підкреслюють, що цифрова трансформація портів має комплексний характер і пов'язана не лише з впровадженням нових технологій, але й із трансформацією організаційних моделей управління портів системами та зміною ролі портів у глобальних транспортних мережах [14, с. 1-10].

Водночас результати систематичного аналізу наукової літератури, проведеного B. Belmoukari, J.-F. Audy та P. Forget, свідчать, що концепція *Smart Port* перебуває на етапі активного теоретичного формування. Автори зазначають, що у більшості наукових робіт досліджуються окремі технологічні аспекти цифровізації портів, тоді як комплексні моделі розвитку портів систем залишаються недостатньо розробленими [12, с. 3-6].

У вітчизняних дослідженнях концепція *Smart Port* також розглядається як один із ключових напрямів технологічної трансформації портової індустрії. У роботах О.В. Кириллової, В.Ю. Кириллової та О.Р. Магамадова показано, що формування концепції *Smart Port* відбувалося еволюційно – від впровадження окремих інноваційних технологій до формування комплексної моделі цифрового управління портів системами [5, с. 77-95; 6, с. 81-87].

Поряд із дослідженнями цифрової трансформації портів важливе місце у науковій літературі займають роботи, присвячені інституційним моделям управління портами. У цих дослідженнях підкреслюється, що класичні моделі *port governance* (*service port*, *tool port*, *landlord port*) формують основу сучасних систем управління портовою інфраструктурою та визначають характер взаємодії державних і приватних суб'єктів портової діяльності [4, с. 122-139; 7; 9].

Окремий напрям досліджень пов'язаний з аналізом ефективності функціонування портів терміналів та організаційно-технологічних аспектів портової діяльності. У роботах О.В. Кириллової та І.М. Ларіної запропоновано підходи до оцінювання умов сталого функціонування контейнерних терміналів, а також обґрунтовано дуальний підхід до розмежування понять «порт» і «портовий термінал» з позицій транспортної науки та організації транспортних процесів [2, с. 75-86; 3, с. 234-242].

Разом із тим аналіз сучасних досліджень свідчить, що більшість наукових робіт зосереджується на окремих аспектах розвитку портових систем. Технологічні питання цифровізації портів досліджуються переважно у межах концепції Smart Port, інституційні аспекти розвитку портів – у межах досліджень державно-приватного партнерства, тоді як організаційно-функціональні характеристики портів розглядаються здебільшого у межах транспортної науки.

Унаслідок цього у сучасних дослідженнях зберігається методологічна фрагментація підходів до аналізу портових систем, що ускладнює формування комплексних теоретичних моделей їх розвитку.

Таким чином, у сучасній транспортній науці залишається невирішеною частина загальної проблеми, яка полягає у відсутності інтегрованого підходу до аналізу технологічних, інституційних та соціально-еколого-економічних аспектів розвитку портових систем. Це зумовлює необхідність формування інтегрованої концептуальної моделі, яка поєднує зазначені виміри у межах єдиної аналітичної рамки. Саме вирішенню цього завдання присвячено дане дослідження.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення та теоретичне обґрунтування тріадної концептуальної моделі розвитку портових систем (*Triadic Framework for Smart Port Development*), яка інтегрує технологічний, інституційний та соціально-еколого-економічний виміри трансформації сучасних портів.

Для досягнення поставленої мети у статті вирішено такі завдання:

- узагальнити сучасні наукові підходи до аналізу цифрової трансформації портових систем, інституційних механізмів розвитку портової інфраструктури та принципів сталого розвитку портової індустрії;

- виявити методологічні обмеження існуючих досліджень, зумовлені фрагментарним розглядом технологічних, інституційних та організаційно-функціональних аспектів розвитку портів;

- обґрунтувати тріадну концептуальну модель розвитку портових систем (*Triadic Framework for Smart Port Development*), яка інтегрує концепції Smart Port, Public – Private Partnership та People – Planet – Profit;

- визначити зміст, функціональну роль та взаємозв'язки технологічного, інституційного та соціально-еколого-економічного вимірів у трансформації сучасних портових систем;

- сформулювати узагальнену аналітичну рамку застосування запропонованої моделі для оціню-

вання стратегій розвитку портів, інфраструктурних проєктів та механізмів концесійної модернізації портової інфраструктури.

Реалізація поставлених завдань забезпечує формування цілісного теоретичного підходу до аналізу трансформації портових систем у межах інтегрованої тріадної моделі.

Виклад основного матеріалу.

1. Тріадна концептуальна модель розвитку «розумних» портів: Smart Port – PPP – 3P (*Triadic Framework for Smart Port Development*).

У сучасних умовах трансформації портової індустрії розвиток портових систем визначається взаємодією кількох ключових груп факторів, серед яких ключове значення мають технологічні інновації, інституційні механізми розвитку інфраструктури та принципи сталого розвитку. Це зумовлює необхідність застосування інтегрованого підходу до аналізу трансформації портових систем.

У межах даного дослідження запропоновано тріадну концептуальну модель розвитку «розумних» портів (*Triadic Framework for Smart Port Development*), яка розглядає розвиток сучасних портових систем як результат взаємодії трьох взаємопов'язаних концептуальних складових:

- Smart Port – технологічний вимір трансформації портів, що передбачає цифровізацію портових процесів, інтеграцію інформаційних платформ управління, автоматизацію операцій та використання сучасних технологій обробки даних;

- PPP (*Public – Private Partnership*) – інституційного механізму модернізації портової інфраструктури, який забезпечує залучення приватних інвестицій, розподіл ризиків між державою та бізнесом і формування ефективних моделей управління портовими активами;

- 3P (*People – Planet – Profit*) – концептуальна рамка оцінювання результатів розвитку портових систем, що відображає необхідність забезпечення економічної ефективності, екологічної стійкості та соціальної відповідальності функціонування портів.

У запропонованій моделі концепція Smart Port визначає технологічний зміст трансформації портових систем, механізми Public – Private Partnership (PPP) формують інституційну основу реалізації інфраструктурних проєктів, тоді як принципи People – Planet – Profit (3P) задають систему критеріїв оцінювання результатів розвитку портових систем у контексті сталого розвитку.

У запропонованій моделі розвиток портових систем інтерпретується як результат взаємодії

трьох рівнів трансформації портової індустрії – технологічного, інституційного та соціально-еколого-економічного, що у сукупності формують інтегровану систему розвитку сучасних портів.

Формалізація моделі. У загальному вигляді розвиток портової системи доцільно представити як функцію взаємодії технологічних, інституційних та соціально-еколого-економічних факторів:

$$PS = f(SP, PPP, 3P),$$

де

PS – рівень розвитку портової системи;

SP – рівень технологічної трансформації порту відповідно до концепції Smart Port;

PPP – ефективність використання механізмів державно-приватного партнерства;

$3P$ – інтегральна характеристика відповідності розвитку портової системи принципам *People – Planet – Profit*.

Запропонована модель дозволяє розглядати трансформацію портових систем у трьох взаємопов'язаних вимірах (табл. 1).

У межах запропонованого підходу цифрова трансформація портів, інституційні механізми розвитку портової інфраструктури та принципи сталого розвитку розглядаються як взаємодоповнювальні складові єдиної системи розвитку портових систем (рис. 1).

Три вершини трикутника (рис. 1) характеризують три взаємопов'язані виміри трансформації портових систем.

Трикутна форма моделі концептуально відображає принцип взаємодії трьох ключових вимірів трансформації портових систем – технологічного, інституційного та виміру сталого розвитку. Кожна вершина трикутника відповідає окремому концептуальному елементу моделі (*Smart Port*, *Public – Private Partnership*, *People – Planet – Profit*), тоді як центральний елемент моделі – розвиток портових систем – відображає результат їхньої взаємодії. Така структура дозволяє розглядати трансформацію портових систем як багатовимірний процес, у якому

технологічні інновації, інституційні механізми та принципи сталого розвитку формують інтегровану основу розвитку портової інфраструктури.

Відповідно до цього в моделі виділяються три ключові виміри розвитку портових систем:

а) Технологічний вимір розвитку портів (*Technological Dimension*) – концепція *Smart Port*.

Основний зміст:

– цифровізація портових процесів (digitalisation of port operations)

– автоматизація терміналів (terminal automation)

– портові інформаційні системи (port community systems)

– управління даними (data-driven port management)

б) Інституційний вимір розвитку портів (*Institutional Dimension*) – механізм PPP (*Public – Private Partnership*).

Основний зміст:

– концесійні моделі портів (port concession models)

– інвестиційні механізми (port investment mechanisms)

– партнерські моделі управління (partnership-based governance)

– інституційна взаємодія держави і бізнесу (state-business cooperation)

в) Вимір сталого розвитку портів (*Sustainability Dimension*) – концепція 3P (*People – Planet – Profit*). У межах запропонованої моделі концепція 3P (*People – Planet – Profit*) відображає вимір сталого розвитку портових систем, який у змістовному плані відповідає соціально-еколого-економічному рівню їх функціонування та розвитку.

Основний зміст:

– соціальна відповідальність портів (social responsibility of ports)

– екологічна сталість (environmental sustainability)

– економічна ефективність (economic efficiency)

Таблиця 1

Концептуальна структура *Triadic Framework for Smart Port Development*

Вимір трансформації портової системи (концептуальна категорія)	Змістовний рівень	Концепція	Роль у розвитку портів
Технологічний вимір розвитку	Технологічний	Smart Port	цифровізація та автоматизація портових процесів
Інституційний вимір розвитку	Інституційний	PPP (<i>Public – Private Partnership</i>)	механізм фінансування та управління розвитком портової інфраструктури
Вимір сталого розвитку	соціально-еколого-економічний	3P (<i>People – Planet – Profit</i>)	критерії сталого розвитку портових систем

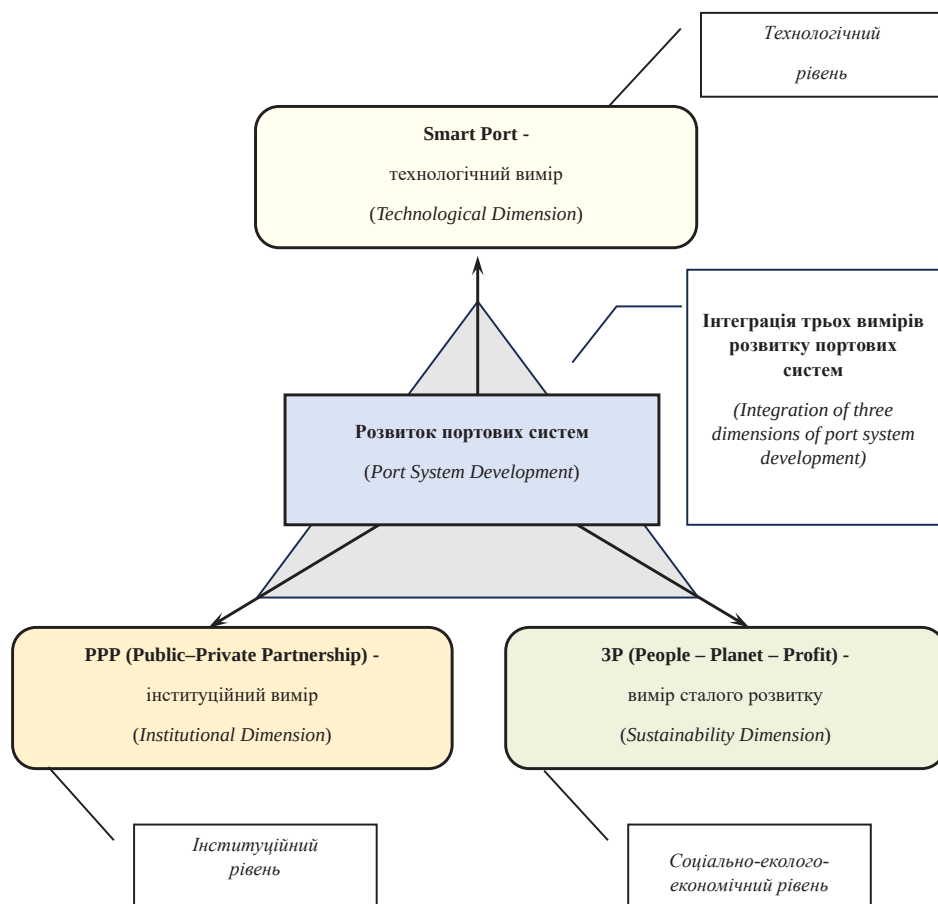


Рис. 1. Тріадна багаторівнева модель розвитку «розумних» портів
(*Triadic Framework for Smart Port Development*)

– декарбонізація портових систем (port decarbonisation)

Таким чином, запропонована тріадна концептуальна модель розвитку «розумних» портів (*Triadic Framework for Smart Port Development*) інтегрує три ключові виміри трансформації портових систем: технологічний (*Smart Port*), інституційний (*Public – Private Partnership*) та вимір сталого розвитку (*People – Planet – Profit*). Їх взаємодія формує системну основу розвитку сучасних портових систем у контексті цифрової трансформації, інституційної модернізації та забезпечення сталого розвитку.

Науковий внесок запропонованої моделі. Запропонована тріадна концептуальна модель розвитку «розумних» портів (*Triadic Framework for Smart Port Development*) формує теоретичну основу інтегрованого аналізу трансформації портових систем.

Науковий внесок авторів полягає у подоланні методологічної фрагментації існуючих підходів до аналізу портових систем шляхом формування нової інтегрованої тріадної концептуальної

моделі їх розвитку, що поєднує технологічний, інституційний та соціально-еколого-економічний виміри трансформації портової індустрії. Зміст цього внеску розкривається у наступному:

По-перше, обґрунтовано доцільність розгляду розвитку сучасних портових систем у межах інтегрованої тріадної моделі, яка поєднує технологічний вимір цифрової трансформації портів (*Smart Port*), інституційні механізми модернізації портової інфраструктури (*Public – Private Partnership*) та принципи сталого розвитку (*People – Planet – Profit*).

По-друге, запропоновано концептуальну інтерпретацію взаємодії технологічних, інституційних та соціально-еколого-економічних факторів розвитку портових систем, що дозволяє розглядати трансформацію портової індустрії як багатовимірний процес, у якому цифровізація портових процесів, механізми партнерства держави і бізнесу та принципи сталого розвитку формують єдину систему розвитку портових інфраструктур.

По-третє, сформовано аналітичну модель взаємодії ключових факторів розвитку портових систем, формалізовану у вигляді функції

$$PS - f(SP, PPP, 3P),$$

що дозволяє інтерпретувати розвиток портових систем як результат синергетичної взаємодії технологічних, інституційних та соціально-еколого-економічних компонентів.

По-четверте, запропонований *Triadic Framework for Smart Port Development* створює методологічну основу для подальшого дослідження моделей управління розвитком портових систем, оцінювання ефективності інфраструктурних проєктів та формування стратегій цифрової та екологічної трансформації портової індустрії.

Запропонована модель розширює існуючі підходи до дослідження розвитку портових систем шляхом інтеграції технологічних, інституційних та соціально-еколого-економічних факторів у межах єдиної концептуальної конструкції.

Таким чином, у роботі сформовано тріадну концептуальну модель розвитку портових систем (*Triadic Framework for Smart Port Development*), яка інтерпретує їх трансформацію як результат взаємодії трьох взаємопов'язаних вимірів – технологічного, інституційного та соціально-еколого-економічного.

2. Ключові виміри Triadic Framework for Smart Port Development

2.1. Технологічний вимір трансформації портових систем: концепція Smart Port. Технологічна трансформація портової індустрії є одним із ключових факторів розвитку сучасних портових систем в умовах цифровізації транспортної інфраструктури та формування глобальних транспортних мереж. У цих умовах традиційні моделі організації портової діяльності поступово трансформуються у цифрово-інтегровані системи управління портовими процесами, що забезпечують підвищення ефективності використання портової інфраструктури, оптимізацію вантажних потоків та інтеграцію портів у міжнародні транспортні мережі.

Концептуальним відображенням цієї трансформації стала концепція *Smart Port*, яка сформувалася внаслідок впровадження технологій Industry 4.0 у портову індустрію. У науковій літературі *Smart Port* інтерпретується як інтегрована система управління портовою діяльністю, що базується на використанні інформаційно-комунікаційних технологій, автоматизації виробничих процесів, цифрових платформ взаємодії учасників транспортного процесу та інструментів аналітики даних та прийняття управлінських рішень [4, 5, 6, 9].

З технологічної точки зору *Smart Port* можна розглядати як цифрово-керовану портову систему,

у межах якої управління портовими операціями здійснюється на основі інтегрованих інформаційних потоків, систем моніторингу та інтелектуального аналізу даних (*advanced data analytics*). Використання таких технологій дозволяє підвищити прозорість портових процесів, оптимізувати використання інфраструктурних ресурсів і скоротити час обробки суден та вантажів.

Ключовими технологічними компонентами концепції *Smart Port* є системи *Internet of Things*, технології обробки великих даних, автоматизовані системи управління портовими операціями, системи підтримки управлінських рішень, а також цифрові платформи обміну інформацією між учасниками транспортного процесу. Інтеграція цих технологій створює передумови для формування єдиного цифрового інформаційного середовища портової діяльності, у межах якого здійснюється координація взаємодії портових операторів, судноплавних компаній, транспортних підприємств та інших учасників ланцюгів постачання.

У практичному вимірі технологічна трансформація портових систем проявляється у цифровізації ключових операційних процесів портової діяльності, зокрема управління суднозаходами, планування вантажно-розвантажувальних операцій, управління складськими процесами, моніторингу руху вантажів та транспортних засобів, а також оптимізації використання портової інфраструктури. Впровадження цифрових систем управління дозволяє підвищити ефективність використання портових потужностей, скоротити час обробки вантажів і забезпечити більш ефективну координацію взаємодії учасників транспортного процесу.

Важливою складовою технологічної трансформації портових систем є розвиток портових інформаційних систем і цифрових платформ, що забезпечують інтеграцію портів у цифрові транспортні коридори та глобальні транспортні мережі. Формування таких платформ сприяє створенню єдиного інформаційного простору портової діяльності та дозволяє забезпечити більш ефективну взаємодію між різними учасниками транспортних систем.

Водночас цифровізація портової діяльності не може розглядатися як самодостатній фактор розвитку портових систем. Ефективність впровадження технологічних інновацій значною мірою залежить від інституційних моделей управління портовою інфраструктурою, інвестиційних механізмів модернізації портових активів та стратегічних підходів до розвитку портових систем.

У цьому контексті технологічний вимір трансформації портів повинен розглядатися у взаємодії з інституційними механізмами розвитку портової інфраструктури та принципами сталого розвитку.

У межах запропонованої *Triadic Framework for Smart Port Development* концепція *Smart Port* виступає ключовим технологічним виміром трансформації портових систем, який визначає цифрову та інноваційну складову їх розвитку. Цей вимір охоплює процеси цифровізації портових операцій, автоматизації виробничих процесів, інтеграції інформаційних систем управління та формування цифрових платформ взаємодії учасників транспортного процесу.

Таким чином, у межах тріадної концептуальної моделі розвитку портових систем концепція *Smart Port* формує технологічну основу трансформації портової індустрії, що створює передумови для підвищення ефективності портових операцій, інтеграції портів у цифрові транспортні мережі та формування нових моделей управління портовою діяльністю.

У цьому контексті технологічна трансформація портових систем, пов'язана із впровадженням концепції *Smart Port*, потребує відповідних інституційних механізмів реалізації інфраструктурних проєктів та залучення інвестицій у модернізацію портової інфраструктури, що зумовлює об'єктивне зростання ролі моделей державно-приватного партнерства у розвитку сучасних портів.

2.2. Інституційні механізми розвитку портів: роль державно-приватного партнерства. Поряд із технологічною трансформацією портової індустрії важливу роль відіграють інституційні механізми, які забезпечують реалізацію інфраструктурних проєктів та модернізацію портових систем. Розвиток сучасних портів потребує значних інвестиційних ресурсів і ефективних моделей управління інфраструктурними активами, що зумовлює об'єктивну необхідність використання механізмів взаємодії державного та приватного секторів.

Одним із ключових інституційних інструментів розвитку портової інфраструктури є державно-приватне партнерство (*Public – Private Partnership, PPP*). У межах цього підходу реалізація інфраструктурних проєктів здійснюється на основі довгострокової співпраці між державними органами та приватними інвесторами, що передбачає розподіл ризиків, інвестиційних зобов'язань та управлінських функцій між державою та приватним партнером.

У портовій індустрії механізми PPP у портовій індустрії реалізуються насамперед у формі кон-

цесійних моделей управління портовими терміналами, розвитку портової інфраструктури та модернізації технологічних процесів обробки вантажів. Залучення приватного капіталу сприяє підвищенню ефективності управління портовими активами, прискоренню інфраструктурного розвитку та впровадженню сучасних технологічних рішень.

Окремі аспекти інституційних механізмів розвитку портових систем та моделей взаємодії держави і приватного сектору детально розглянуто у попередніх дослідженнях автора [8], де обґрунтовано роль партнерських механізмів у модернізації портової інфраструктури.

У межах запропонованої тріадної концептуальної моделі розвитку портових систем механізми PPP розглядаються як ключова інституційна основа реалізації інфраструктурних проєктів, що формує організаційні та фінансові умови модернізації портових систем.

2.3. Принципи сталого розвитку портових систем: підхід *People – Planet – Profit*. Сучасний розвиток портової індустрії дедалі більше визначається об'єктивною необхідністю інтеграції принципів сталого розвитку у процеси функціонування та модернізації портових систем. У цьому контексті важливим концептуальним підходом до аналізу та оцінювання розвитку портових систем є модель *People – Planet – Profit (3P)*, яка передбачає збалансування соціальних, екологічних та економічних аспектів розвитку.

Підхід 3P розглядає розвиток економічних систем як результат узгодження трьох взаємопов'язаних вимірів: соціального, екологічного та економічного. У застосуванні до портової індустрії це означає необхідність забезпечення економічної ефективності портових операцій, зниження негативного впливу на навколишнє середовище та врахування соціальних аспектів розвитку портових територій.

У прикладному (операційному) вимірі реалізація принципів сталого розвитку у портовій діяльності охоплює комплекс взаємопов'язаних напрямів. Зокрема, це зниження екологічного навантаження на портові екосистеми, впровадження енергоефективних технологій, розвиток систем екологічного моніторингу та реалізація стратегій декарбонізації та зниження вуглецевого сліду портової діяльності. Водночас важливим аспектом є забезпечення соціальної відповідальності портових операторів, розвиток людського капіталу та професійних компетенцій персоналу, а також формування сприятливого соціально-економічного середовища у портових регіонах.

У межах запропонованої тріадної моделі концепція 3Р визначає соціально-еколого-економічний вимір трансформації портів систем та формує систему критеріїв оцінювання результатів їх трансформації у контексті сталого розвитку.

У цьому контексті принципи *People – Planet – Profit* виступають не лише нормативною рамкою сталого розвитку, а й аналітичним інструментом оцінювання довгострокової ефективності трансформації портів систем.

2.4. Інтегрована модель розвитку портів систем. Розглянуті технологічний, інституційний та соціально-еколого-економічний виміри трансформації портів систем формують інтегровану систему факторів розвитку сучасної портової індустрії. У межах запропонованої концептуальної моделі розвиток портів систем інтерпретується як результат взаємодії трьох взаємодоповнювальних складових: цифрової трансформації портів процесів, інституційних механізмів реалізації інфраструктурних проєктів та принципів сталого розвитку.

Технологічні інновації, що реалізуються в межах концепції *Smart Port*, створюють системні передумови підвищення ефективності портів операцій та інтеграції портів у цифрові транспортні системи. Інституційні механізми *Public – Private Partnership* забезпечують організаційні та фінансові умови модернізації портової інфраструктури, тоді як принципи концепції *People – Planet – Profit* формують систему критеріїв оцінювання довгострокових результатів розвитку портів систем.

Інтеграція цих складових відображає багатовимірний характер трансформації портів систем і дозволяє інтерпретувати розвиток портової індустрії як результат синергетичної взаємодії технологічних, інституційних та соціально-еколого-економічних факторів.

Таким чином, у межах запропонованої моделі кожен із трьох концептуальних компонентів виконує функціонально визначену роль у трансформації портів систем: *Smart Port* визначає технологічну основу цифрової трансформації портової діяльності, механізми *Public – Private Partnership* забезпечують інституційні та інвестиційні умови розвитку портової інфраструктури, тоді як концепція *People – Planet – Profit* формує систему критеріїв оцінювання результатів розвитку портів систем у контексті сталого розвитку.

У цьому контексті запропонована *Triadic Framework for Smart Port Development* виступає інтегрованою аналітичною моделлю дослідження

трансформації портів систем, яка дозволяє інтегрувати ключові напрями розвитку портової індустрії у єдину концептуальну структуру.

Запропонований *Triadic Framework for Smart Port Development* може бути використаний як аналітична рамка для оцінювання різних сценаріїв розвитку портів систем. У межах цього підходу альтернативні стратегії розвитку та модернізації портів можуть аналізуватися з урахуванням трьох взаємопов'язаних вимірів трансформації портової індустрії – технологічного, інституційного та соціально-еколого-економічного.

Використання запропонованої моделі дозволяє здійснювати комплексну багатокритеріальну оцінку інфраструктурних проєктів, стратегій цифрової модернізації портів та альтернативних моделей розвитку портової індустрії з урахуванням їх технологічних характеристик, інституційних механізмів реалізації та відповідності принципам сталого розвитку. У прикладному вимірі запропонований підхід може застосовуватися для аналізу перспектив розвитку національних портів систем, зокрема портів України, у процесі їх цифрової, інституційної та екологічної трансформації, а також для обґрунтування стратегічних інфраструктурних проєктів, включаючи проєкти концесійного розвитку портової інфраструктури.

Запропонована концептуальна модель інтегрує ключові напрями сучасних досліджень портової індустрії – цифрову трансформацію портів (*Smart Port*), інституційні механізми управління портовою інфраструктурою (*Public – Private Partnership*) та принципи сталого розвитку (*People – Planet – Profit*), формуючи цілісну аналітичну рамку дослідження. Поєднання цих підходів дозволяє розглядати трансформацію портів систем як багатовимірний процес, у якому технологічні інновації, інституційні механізми та принципи сталого розвитку формують інтегровану систему розвитку портової індустрії.

Подальший розвиток запропонованої моделі пов'язаний із формалізацією системи показників оцінювання її окремих вимірів та розробленням методів інтегрованого аналізу їх взаємодії. Це створює передумови для використання *Triadic Framework for Smart Port Development* як інструменту порівняльного аналізу стратегій розвитку портів систем та оцінювання ефективності інфраструктурних проєктів у портової індустрії.

Таким чином, запропонована тріадна концептуальна модель розвитку портів систем (*Triadic Framework for Smart Port Development*) формує інтегровану аналітичну рамку дослідження трансформації

ції портової індустрії, у межах якої технологічний, інституційний та соціально-еколого-економічний виміри розглядаються як взаємопов'язані та взаємозумовлені складові єдиного процесу розвитку. Такий підхід дозволяє не лише системно інтерпретувати сучасні трансформаційні процеси у портовій індустрії, але й забезпечує теоретичну основу для обґрунтування стратегічних рішень щодо модернізації портових систем, зокрема в умовах реалізації проєктів державно-приватного партнерства та концесійного розвитку.

На відміну від існуючих підходів, у яких технологічні, інституційні та соціально-еколого-економічні аспекти розвитку портових систем розглядаються переважно ізольовано, запропонована модель забезпечує їх інтеграцію у межах єдиної аналітичної конструкції, що дозволяє подолати методологічну фрагментацію сучасних досліджень.

Висновки. У межах проведеного дослідження обґрунтовано концептуальний підхід до аналізу розвитку сучасних портових систем, що ґрунтується на інтеграції технологічних, інституційних та соціально-еколого-економічних аспектів трансформації портової індустрії. На відміну від існуючих підходів, у яких концепція Smart Port інтерпретується переважно як технологічна модернізація портових операцій, у даному дослідженні розвиток інтелектуальних портів інтерпретується як комплексний процес структурної трансформації портових систем.

У результаті дослідження сформовано *Triadic Framework for Smart Port Development* – концептуальну модель, що інтегрує три взаємопов'язані виміри розвитку портових систем: технологічний (*Smart Port*), інституційний (*Public – Private Partnership*) та соціально-еколого-економічний (*People – Planet – Profit*). Запропонована модель формує методологічну основу для інтегрованого аналізу процесів модернізації портової індустрії в умовах цифрової трансформації та переходу до принципів сталого розвитку.

Отримані результати дозволяють обґрунтувати неможливість редукції розвитку інтелектуальних портів виключно до технологічної модернізації. Цифрові технології є лише одним із компонентів трансформації, тоді як визначальну роль відіграє узгоджена взаємодія технологічних інновацій, інституційних механізмів управління (зокрема

моделей державно-приватного партнерства та концесій) і принципів сталого розвитку.

У прикладному вимірі запропонована концептуальна рамка може бути використана як аналітичний інструмент для оцінювання стратегій розвитку портових систем, інфраструктурних проєктів та моделей модернізації портової індустрії. Зокрема, вона створює можливості для комплексного аналізу проєктів розвитку портів із урахуванням їх технологічних характеристик, інституційних механізмів реалізації та відповідності принципам сталого розвитку, що набуває особливої актуальності при обґрунтуванні концесійних моделей розвитку портової інфраструктури.

Науковий внесок дослідження полягає у формуванні інтегрованого концептуального підходу до аналізу розвитку портових систем, який дозволяє розглядати *Smart Port* не як окремих технологічний стан порту, а як результат системної взаємодії технологічних, інституційних та соціально-еколого-економічних факторів розвитку портових систем.

Узагальнюючи результати дослідження, розвиток інтелектуальних портів може бути представлений як процес, що відбувається на перетині трьох взаємопов'язаних вимірів трансформації портової індустрії – технологічного, інституційного та виміру сталого розвитку. У цьому контексті запропонований підхід може бути формалізований у вигляді концептуальної моделі *Triadic Framework for Smart Port Development*, відповідно до якої:

$$\text{Smart Port} = \text{Technology} + \text{Governance} + \text{Sustainability}$$

З практичної точки зору запропонована модель може використовуватися як концептуальна основа для формування стратегій розвитку портів, оцінювання ефективності інфраструктурних проєктів та обґрунтування управлінських рішень у сфері модернізації портової інфраструктури.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на формалізацію запропонованої моделі, зокрема розроблення системи кількісних індикаторів оцінювання кожного з її вимірів, визначення їх вагових коефіцієнтів та створення інструментарію інтегрованого аналізу їх взаємодії.

Список літератури:

1. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Теоретичні основи просторової та функціональної еволюції портів і портових систем. *Проблеми функціонування та розвитку портів* : монографія / за ред. О.В. Кириллової, І.М. Іванової. Львів–Торунь : Liha-Pres, 2022. Т. 7. С. 78–110. DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-289-3>.
2. Кириллова О.В., Ларіна І.М. Критерії та умови сталого функціонування контейнерного терміналу порту. *Водний транспорт : збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2025. Вип. 2(43). С. 75–86. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.06>.

3. Кириллова О.В., Ларіна І.М. Дуальний підхід до розмежування поглядів на сучасний порт і портовий термінал з позицій транспортної науки і логістики. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75). № 2. Ч. 1. С. 234–242. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/35>.
4. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Smart-кластери в портовій системі України: концептуальні засади та прикладні орієнтири. *Transport Development*. 2025. № 2(25). С. 122–139. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.10>.
5. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. «Smart Ports» як інноваційний вектор технологічної трансформації та цифровізації портів: від ідеї до концепції та практичної реалізації. *Розвиток транспорту*. 2024. № 4(23). С. 77–95. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.4-23.07>.
6. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю., Мамамадов О.Р. Поняття «Smart Port» у контексті глобальних тенденцій інтеграції інтелектуальних транспортних та інформаційних технологій у портовій індустрії. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74). № 5. С. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/14>.
7. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Класичні системи управління портами та їх концептуальні моделі. *Наукові вісті Давидського університету*. 2023. № 24. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24>.
8. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Приватизація портів: ризики, регуляторні механізми та стратегічні альтернативи для України. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75). № 4. С. 295–301. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/38>.
9. Kyryllova O.V., Kyryllova V.Yu. Smart port clusters as a modern tool for the development of the global transport communications system and a strategic vector of the post-war recovery of Ukraine's port industry. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75). № 6. Ч. 1. С. 263–269. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/39>.
10. Хайліг Л., Фосс С. А scientometric analysis of the academic literature on smart ports. *Maritime Policy & Management*. 2017. Vol. 44(7). P. 843–858. DOI: <https://doi.org/10.1080/03088839.2017.1336509>.
11. Молаві А., Лім Г. Дж., Рейс Б. A framework for building a smart port and smart port index. *International Journal of Sustainable Transportation*. 2020. Vol. 14(9). P. 686–700. DOI: <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1610919>.
12. Бельмукарі Б., Оді Ж.-Ф., Форже П. Smart port: a systematic literature review. *European Transport Research Review*. 2023. Vol. 15. Article 4. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00581-6>.
13. Дваракіші Г. С., Салім А. М. Review on the role of ports in the development of a nation. *Ocean & Coastal Management*. 2015. Vol. 102. P. 13–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.09.011>.
14. Парола Ф., Феппарі К., Теї А. Determinants of port competitiveness: insights from the container shipping industry. *Transport Policy*. 2015. Vol. 41. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.03.004>.
15. Аччіаро М. та ін. Digitalization in container shipping: a systematic literature review. *Transport Reviews*. 2020. Vol. 40(1). P. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1642313>.
16. Лам Дж. С. Л., Яп В. І. A stakeholder perspective of port city sustainable development. *Transport Reviews*. 2019. Vol. 39(3). P. 311–331. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1520224>.

Kyryllova V.Yu., Kyryllova O.V. TRIADIC CONCEPTUAL MODEL OF PORT SYSTEM

DEVELOPMENT: SMART PORT, PUBLIC–PRIVATE PARTNERSHIP, PEOPLE–PLANET–PROFIT

The current stage of port industry development is characterized by profound transformation processes driven by the digitalization of transport infrastructure, the evolution of institutional models of port governance, and the increasing role of sustainable development principles in the functioning of transport systems. Under these conditions, ports are increasingly transforming from elements of transport infrastructure into complex organizational and technological systems integrated into global transport networks and material flow distribution systems. This necessitates the development of integrated theoretical approaches to the analysis of port system transformation.

The aim of the article is to provide a theoretical substantiation of an integrated conceptual approach to the analysis of port system development based on the formation of a triadic model of their transformation. The study proposes the Triadic Framework for Smart Port Development – a conceptual model that integrates three key dimensions of port industry transformation: technological (the Smart Port concept), institutional (Public – Private Partnership mechanisms), and socio-environmental-economic (People – Planet – Profit principles).

The study generalizes contemporary scientific approaches to the analysis of port digital transformation, institutional models of port infrastructure governance, and sustainable development concepts. It is demonstrated that existing research is characterized by methodological fragmentation caused by the isolated consideration of technological, institutional, and socio-environmental-economic aspects of port system development. The proposed model overcomes this fragmentation by integrating these dimensions within a unified analytical framework.

The conceptual model is formalized as a functional relationship between the level of port system development and the degree of technological transformation, the effectiveness of institutional mechanisms, and compliance with sustainable development principles. It is shown that the interaction of these components forms an integrated system for port development under conditions of digital transformation.

The practical significance of the proposed approach lies in its applicability as an analytical tool for evaluating port development strategies, analyzing infrastructure projects, and supporting decision-making in port infrastructure modernization. In particular, the Triadic Framework for Smart Port Development can be applied for the comprehensive analysis of alternative development models of port systems, including public–private partnership projects and concession-based port development.

Keywords: transport systems, transport technologies, inland and maritime transport, port systems, Smart Port, public-private partnership, concession, sustainable development, digital transformation of ports, port infrastructure.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Коваленко Н.О.<https://orcid.org/0000-0002-1651-9750>

Українська державна льотна академія

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЦИФРОВІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ АВІАЦІЙНОЮ ДІЯЛЬНІСТЮ: ІНЖЕНЕРНО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ТА ІНЖИНІРИНГОВІ РІШЕННЯ

У статті здійснено дослідження проблемних аспектів та перспектив розвитку цифровізації управління авіаційною діяльністю в умовах трансформації світового ринку авіаперевезень, посилення конкуренції та підвищення вимог до ефективності функціонування авіаційних підприємств. Доведено, що цифровізація є визначальним інструментом забезпечення конкурентоспроможності суб'єктів авіаційного транспорту, підвищення гнучкості управлінських процесів та їх адаптації до динамічних змін зовнішнього середовища. Встановлено, що сучасні тенденції розвитку галузі характеризуються активним впровадженням цифрових технологій, зокрема систем підтримки прийняття рішень, автоматизованих інформаційних систем, цифрових платформ, технологій обробки великих масивів даних та інтелектуального аналізу інформації. У дослідженні проаналізовано інженерно-економічні аспекти цифровізації, що включають оцінювання ефективності впровадження цифрових рішень, оптимізацію витрат, підвищення продуктивності ресурсів та покращення якості управлінських рішень.

Обґрунтовано, що застосування інжинірингових підходів забезпечує системність цифрової трансформації, сприяє інтеграції технологічних та економічних компонентів та підвищує рівень обґрунтованості управлінських рішень на основі аналітичних моделей і прогнозування. Визначено роль цифрових інструментів у підвищенні ефективності експлуатаційних процесів, управлінні ресурсами, плануванні діяльності та забезпеченні безпеки авіаційних перевезень. Науковою новизною дослідження є розроблення та обґрунтування моделі інтеграції інженерно-економічного аналізу та інжинірингових рішень у цифровому управлінні авіаційною діяльністю, яка забезпечує узгодження технологічних, економічних та управлінських компонентів і формування обґрунтованих управлінських рішень. Доведено, що ефективна цифрова трансформація потребує комплексного підходу, який передбачає узгодження інженерних, економічних та організаційних рішень. Запропоновано концептуальний підхід до цифровізації управління авіаційною діяльністю, що базується на інтеграції інженерно-економічного аналізу, сучасних інформаційних технологій та інжинірингових рішень у єдину цифрову екосистему управління. Обґрунтовано доцільність використання цифрових платформ та інтелектуальних систем для підвищення прозорості, адаптивності та ефективності управління авіаційними підприємствами.

Ключові слова: авіаційне підприємство, автоматизація, великі дані, ефективність, інформаційні системи, інженерно-економічний аналіз, інжиніринг, цифрова трансформація, цифровізація, управління авіаційною діяльністю.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток авіаційного транспорту відбувається в умовах масштабних трансформацій, зумовлених цифровізацією економічних процесів, посиленням конкуренції на міжнародному ринку авіаперевезень, а також підвищенням вимог до ефективності функціонування, безпеки та якості обслуговування пасажирських і вантажних потоків. За таких умов традиційні підходи до управління авіаційною діяльністю втрачають здатність оперативно реагувати на динамічні зміни зовнішнього середовища, що обумовлює необхідність впровадження

сучасних цифрових технологій і інжинірингових рішень у систему управління авіаційними підприємствами.

Незважаючи на інтенсивний розвиток цифрових інструментів, їх використання в авіаційній сфері носить переважно фрагментарний характер і не завжди супроводжується належним інженерно-економічним обґрунтуванням. Це призводить до нераціонального використання ресурсів, збільшення витрат на реалізацію цифрових ініціатив та недостатнього рівня інтеграції інформаційних систем у єдину управлінську інфраструктуру.

Крім того, відсутність цілісного підходу до цифровізації, який би поєднував технічні, економічні та організаційні аспекти, стримує підвищення ефективності діяльності авіаційних підприємств.

У цьому контексті особливої значущості набуває проблема розроблення науково обґрунтованих підходів до цифровізації управління авіаційною діяльністю, що базуються на поєднанні інженерно-економічного аналізу та інжинірингових методів. Такий підхід дозволяє забезпечити системність, гнучкість та результативність управлінських рішень. Водночас потребують подальшого вивчення питання оцінювання ефективності впровадження цифрових технологій, інтеграції інформаційних систем, удосконалення управлінських процесів та створення інструментів підтримки прийняття рішень у цифровому середовищі.

Таким чином, формується науково-практична проблема, сутність якої полягає у необхідності розроблення концептуальних і методичних засад цифровізації управління авіаційною діяльністю, спрямованих на узгодження інженерних, економічних та організаційних компонентів, підвищення ефективності функціонування авіаційних підприємств і забезпечення їх адаптації до умов цифрової економіки. Розв'язання зазначеної проблеми має важливе значення як для розвитку теоретичних основ управління авіаційною діяльністю, так і для вирішення прикладних завдань підвищення конкурентоспроможності, економічної результативності та інноваційного розвитку суб'єктів авіаційного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі розвитку авіаційного транспорту цифровізація управління авіаційною діяльністю набуває статусу одного з ключових напрямів наукових досліджень, що зумовлено трансформацією галузевих бізнес-моделей, інтенсифікацією інформаційних потоків та необхідністю підвищення ефективності функціонування суб'єктів авіаційного транспорту. Водночас, незважаючи на значний масив наукових праць у сфері цифрових трансформацій, дослідження мають переважно диференційований характер, зосереджуючись на окремих аспектах цифровізації (авіакомпанії, аеропорти, системи управління повітряним рухом), що обумовлює фрагментарність наукового знання та потребу у його систематизації.

Так, у роботах А. Sukhorukov, N. Koryagin, J. Sulyagina, N. Ulitskaya та S. Eroshkin [1] цифрова трансформація управління авіакомпаніями розглядається як основа їх інноваційного розвитку, що передбачає інтеграцію інформаційних систем у процес прийняття управлінських рішень та трансформацію організаційних структур. У дослідженні

А. Kiyıklık, А. О. Kuşakcı та В. Mbowe [2] запропоновано модель цифрової зрілості авіакомпаній, яка ґрунтується на оцінюванні рівня розвитку цифрової стратегії, технологічної інфраструктури, операційних процесів та інноваційного потенціалу, що дозволяє комплексно оцінити готовність підприємств до цифрової трансформації.

У наукових працях І. Kovynyov та R. Mikut [3], а також Т. Remencová та А. Novák Sedláčková [4] досліджено особливості впровадження цифрових технологій в аеропортовій діяльності, зокрема у сфері наземного обслуговування та управління інфраструктурними процесами. Автори обґрунтовують, що цифровізація аеропортових операцій сприяє підвищенню операційної ефективності, зниженню витрат та формуванню нових джерел доходу, водночас акцентуючи увагу на необхідності інтеграції інформаційних систем у єдине цифрове середовище управління.

Подальший розвиток зазначеної проблематики відображено у роботах О. Katerna та К. Molchanova [5], де визначено ключову роль сучасних цифрових технологій (Big Data, штучний інтелект, біометричні системи, роботизовані сервіси) у модернізації діяльності аеропортів. У близькому науковому контексті О. Boyko [6] досліджує можливості використання геоінформаційних технологій, BIM/GIS-інтеграції та цифрових двійників для підвищення ефективності адміністративно-господарського управління аеропортовими комплексами, що свідчить про розширення меж цифровізації від операційного до стратегічного рівня управління.

Важливий внесок у розвиток теоретичних засад цифровізації авіаційного транспорту здійснено у дослідженні J. La та I. Heiets [7], де цифровізація розглядається як системне явище, що охоплює взаємодію авіакомпаній, аеропортів та систем управління повітряним рухом, забезпечуючи підвищення адаптивності, безпеки та результативності функціонування авіаційної системи загалом. У свою чергу, сучасні дослідження (С. Hsu, J.Yen та ін. [8]) акцентують увагу на застосуванні інформаційно-аналітичних систем та технологій штучного інтелекту для управління життєвим циклом авіаційної техніки, що розширює предметне поле цифровізації до інжинірингового та техніко-економічного виміру.

Водночас результати проведеного аналізу наукових джерел свідчать, що, незважаючи на значний обсяг досліджень, присвячених окремим аспектам цифрової трансформації, низка ключових питань залишається недостатньо опрацьованою. Зокрема, потребують подальшого дослідження проблеми комплексного інженерно-економічного обґрун-

тування процесів цифровізації управління авіаційною діяльністю, інтеграції сучасних цифрових технологій у систему прийняття управлінських рішень, оцінювання ефективності впровадження інжинірингових цифрових рішень, а також формування цілісної концепції цифрового управління, що забезпечує узгодження технічних, економічних та організаційних складових. Це зумовлює необхідність поглиблення наукових досліджень у напрямі розроблення теоретико-методичних підходів до цифровізації управління авіаційною діяльністю на основі інтеграції інженерно-економічного аналізу та інжинірингових інструментів.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження інженерно-економічних аспектів цифровізації управління авіаційною діяльністю та визначення ролі інжинірингових рішень у підвищенні ефективності управління.

Виклад основного матеріалу. Цифровізація управління авіаційною діяльністю у сучасних умовах виступає системоутворюючим фактором підвищення ефективності функціонування суб'єктів авіаційного транспорту, що обумовлено зростанням складності операційних процесів, необхідністю обробки значних обсягів даних та забезпечення оперативності прийняття управлінських рішень. Водночас цифрова трансформація галузі супроводжується низкою проблем, ключовою серед яких є недостатній рівень інженерно-економічного обґрунтування впровадження цифрових технологій, що призводить до дисбалансу між витратами на цифровізацію та отриманими результатами [1, с. 56]. У науковому аспекті інженерно-економічні аспекти цифровізації управління авіаційною діяльністю визначаються як сукупність методичних підходів до оцінювання техніко-технологічних параметрів цифрових рішень у взаємозв'язку з їх економічною ефективністю. Узагальнення ключових характеристик цифрових рішень у контексті інженерно-економічного аналізу наведено у табл. 1.

Ключовими складовими інженерно-економічного аналізу є визначення інвестиційних та експлуатаційних витрат, оцінювання економічного

ефекту від впровадження цифрових технологій, а також розрахунок інтегральних показників ефективності (NPV, IRR, PI), що дозволяє здійснити обґрунтований вибір управлінських рішень [11].

Концептуальна модель взаємодії інженерно-економічного аналізу та інжинірингових рішень у системі цифрового управління авіаційною діяльністю представлена на рис. 1.



Рис. 1 Модель інтеграції інженерно-економічного аналізу та інжинірингових рішень у цифровому управлінні авіаційною діяльністю

Джерело: узагальнено автором

Таблиця 1

Інженерно-економічна характеристика цифрових рішень в управлінні авіаційною діяльністю

Напрямок цифровізації	Інженерна складова	Економічний ефект	Показники оцінювання
Автоматизація пасажирських процесів (PSS, DCS)	Інтеграція інформаційних систем	Зниження витрат на обслуговування	NPV, ROI
Аналітика Big Data	Обробка великих масивів даних	Оптимізація маршрутної мережі	IRR, приріст доходу
Штучний інтелект (AI)	Оптимізація ресурсів	Скорочення простоїв	PI, OPEX
IoT-технології	Моніторинг технічного стану ПС	Зменшення витрат на ТОiP	Економія витрат

Джерело: систематизовано автором

Поряд із цим, ефективна реалізація цифровізації неможлива без застосування інжинірингових рішень, які забезпечують інтеграцію цифрових технологій у систему управління авіаційною діяльністю. Інжиніринг у даному контексті виступає як процес проєктування та оптимізації цифрових систем з урахуванням технічних і економічних параметрів їх функціонування [3, с. 112].

Аналізуючи рис. 1, варто відзначити, що представлена модель відображає інтеграційну взаємодію інженерно-економічного аналізу та інжинірингових рішень у контексті цифровізації управління авіаційною діяльністю як цілісної динамічної системи. Модель структурована за принципом ієрархічної декомпозиції функціональних підсистем, що дозволяє забезпечити системність, узгодженість та цілеспрямованість управлінських впливів.

Вихідним елементом моделі виступає зовнішнє середовище, яке формує екзогенні чинники впливу (ринкові умови, конкурентне середовище, регуляторні обмеження), що визначають параметри функціонування авіаційного підприємства. На основі цього формується сукупність вхідних даних і ресурсів, які є інформаційною базою для подальшої цифрової обробки та аналітичного забезпечення управління.

Технологічна підсистема виконує функції накопичення, інтеграції та обробки інформаційних потоків із використанням сучасних цифрових технологій, зокрема інформаційних систем, інструментів Big Data та технологій штучного інтелекту. Це створює передумови для підвищення оперативності обробки даних і забезпечення більш високого рівня достовірності управлінських рішень. Водночас аналітична (інженерно-економічна) підсистема спрямована на оцінювання ефективності впровадження цифрових рішень із використанням інтегральних економічних показників (NPV, IRR, PI), що дозволяє забезпечити економічну обґрунтованість процесів цифрової трансформації [9, с. 940].

Інжинірингова підсистема виступає інструментом перетворення результатів аналітичних розрахунків у конкретні техніко-технологічні рішення, орієнтовані на вдосконалення бізнес-процесів і впровадження цифрових технологій у діяльність авіаційного підприємства. У результаті такої взаємодії формується синергетичний ефект, який проявляється у взаємному підсиленні інженерних, економічних та інформаційних компонентів і забезпечує зростання загальної ефективності системи управління.

Управлінська підсистема забезпечує реалізацію основних функцій менеджменту, а саме планування, організації, мотивації та контролю, трансформуючи результати аналітичних і інжинірингових процесів у практичні управлінські рішення. Наслідком функціонування запропонованої моделі є досягнення мультиплікативного ефекту, що проявляється у зменшенні операційних витрат, підвищенні якості прийняття управлінських рішень, більш раціональному використанні ресурсів і зростанні конкурентоспроможності авіаційних підприємств.

Важливою ознакою моделі є наявність механізму зворотного зв'язку, який забезпечує її адаптивність і здатність до саморегулювання шляхом коригування параметрів функціонування відповідно до отриманих результатів. Це дає підстави розглядати цифровізацію управління авіаційною діяльністю як безперервний ітеративний процес, що характеризується високим рівнем гнучкості, адаптивності та стійкості до впливу зовнішнього середовища.

Подальший розвиток запропонованої моделі потребує конкретизації інструментального забезпечення цифровізації управління авіаційною діяльністю. У цьому контексті цифровізація реалізується через впровадження комплексу сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, які забезпечують автоматизацію, інтеграцію та інтелектуалізацію управлінських процесів. Зокрема, ключову роль відіграють системи управління пасажирськими перевезеннями (PSS) та системи контролю відправлення (DCS), які забезпечують автоматизацію процесів бронювання, реєстрації пасажирів та управління потоками перевезень.

Важливим напрямом цифровізації є використання аналітичних технологій Big Data, що дозволяють здійснювати обробку значних обсягів даних з метою прогнозування попиту, оптимізації маршрутної мережі та підвищення ефективності використання ресурсів. У поєднанні з технологіями штучного інтелекту (AI) це забезпечує формування систем підтримки прийняття рішень, здатних адаптуватися до змін зовнішнього середовища та мінімізувати управлінські ризики [10, с. 190].

Суттєвого значення набувають також IoT-технології, які забезпечують моніторинг технічного стану повітряних суден у режимі реального часу, що сприяє зниженню витрат на технічне обслуговування та підвищенню рівня безпеки польотів. Поряд із цим, впровадження цифрових платформ управління (AODB, інтегровані інфор-

маційні системи) дозволяє забезпечити синхронізацію інформаційних потоків між різними підрозділами авіаційного підприємства.

Окремим напрямом цифровізації є застосування концепції цифрових двійників (Digital Twin), які дозволяють моделювати експлуатаційні процеси, прогнозувати їх розвиток та оцінювати ефективність управлінських рішень ще до їх практичної реалізації. Це значно підвищує рівень обґрунтованості управління та сприяє зниженню витрат, пов'язаних із впровадженням інноваційних рішень.

Таким чином, цифровізація управління авіаційною діяльністю здійснюється на основі комплексного використання інформаційних систем, аналітичних технологій та інжинірингових рішень, що забезпечує перехід від традиційного до data-driven управління, орієнтованого на підвищення ефективності, адаптивності та конкурентоспроможності авіаційних підприємств.

Практична реалізація зазначених підходів може бути проілюстрована на прикладі організації пасажирських перевезень із пересадками, що набуває особливої актуальності для авіакомпаній, орієнтованих на розширення маршрутної мережі, зокрема типу SkyUp Airlines [12]. У таких умовах цифровізація управління передбачає впровадження інтегрованих інформаційних систем, які забезпечують координацію стикувальних рейсів, автоматичне перепланування маршрутів у разі затримок, а також оперативне інформування пасажирів. Застосування аналітики великих даних дозволяє прогнозувати потоки трансферних пасажирів, оптимізувати мінімальний час стикування (МСТ) та підвищувати рівень завантаження рейсів.

Використання технологій штучного інтелекту у цьому контексті сприяє формуванню адаптивних алгоритмів управління пересадочними процесами, що дозволяє мінімізувати ризики втрати стикувань, зменшити витрати на компенсації пасажирів та підвищити рівень сервісу. Водночас інжинірингові рішення забезпечують інтеграцію систем управління рейсами, обслуговування пасажирів та опе-

раційної діяльності в єдину цифрову платформу, що дозволяє синхронізувати інформаційні потоки та підвищити ефективність управління.

З інженерно-економічної точки зору впровадження цифрових рішень у процес організації пересадочних перевезень забезпечує мультиплікативний ефект, що проявляється у зростанні доходів за рахунок збільшення пасажиропотоку, зниженні операційних витрат, пов'язаних із затримками та неузгодженістю рейсів, а також підвищенні рівня задоволеності пасажирів. Це підтверджує доцільність використання комплексного підходу до цифровізації управління авіаційною діяльністю, що базується на інтеграції інженерно-економічного аналізу та інжинірингових рішень.

Висновки. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано, що цифровізація управління авіаційною діяльністю є ключовим чинником підвищення ефективності функціонування авіаційних підприємств в умовах трансформації галузі. Доведено, що досягнення максимального ефекту цифрової трансформації можливе лише за умови інтеграції інженерно-економічного аналізу та інжинірингових рішень, що забезпечує обґрунтованість управлінських рішень, оптимізацію витрат і підвищення конкурентоспроможності. Запропонована модель дозволяє систематизувати процес цифровізації та відобразити взаємозв'язок технологічних, аналітичних і управлінських компонентів, формуючи мультиплікативний ефект у діяльності авіаційних підприємств.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці методичного інструментарію кількісної оцінки ефективності цифрових рішень, зокрема з використанням інтегральних показників (NPV, IRR, PI), а також у поглибленні досліджень щодо застосування штучного інтелекту, цифрових двійників та систем підтримки прийняття рішень у процесах управління авіаційною діяльністю. Окремої уваги потребує розробка прикладних моделей цифровізації організації пересадочних авіаперевезень та їх адаптація до умов функціонування сучасних авіакомпаній.

Список літератури:

1. Sukhorukov A., Koryagin N., Sulyagina J. та ін. Digital Transformation of Airline Management as the Basis of Innovative Development. VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Cham: Springer, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_83
2. Kıyıklık A., Kuşakcı A. O., Mbowe B. A digital transformation maturity model for the airline industry with a self-assessment tool. *Digital Applications in Aviation and Transport*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100055>
3. Kovynyov I., Mikut R. Digital technologies in airport ground operations. *Measurement Techniques*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11066-019-09132-5>

4. Remencová T., Novák Sedláčková A. Modernization of digital technologies at regional airports and its potential impact on cost reduction. *Transportation Research Procedia*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.06.003>
5. Katerna O., Molchanova K. Technological solutions for airports development during the digital transformation period. *Економічний аналіз*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.35774/econa2021.03.143>
6. La J., Heiets I. The impact of digitalization and intelligentization on air transportation system // *Aviation*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3846/aviation.2021.15336>
7. Боуко О. Перспективи використання геоінформаційних технологій в аеропортах України для адміністративно-господарського управління // *Технічні науки та технології*. 2020. № 4(22). С. 247–257. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-247-257](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-247-257)
8. Hsu C. I., Yen J. M. Analysis of passenger flow in airport terminal with Monte Carlo simulation and Petri net. *Journal of Transportation Engineering*. 2026. Vol. 132, No. 11. P. 856–865. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2026\)132:11\(856\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2026)132:11(856))
9. Tam M., Lam W. H. Forecasting of air passenger traffic using seasonal ARIMA with intervention. *Journal of Transportation Engineering*. 2025. Vol. 134, No. 11. P. 939–948. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2025\)134:11\(939\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2025)134:11(939))
10. Tosić V., Babić O. Intelligent decision support systems for airport operations management. *Transportation Research Procedia*. 2025. Vol. 30. P. 187–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.09.020>
11. Коваленко Н.О. Інженерно-економічний аналіз як інструмент підвищення ефективності організації та управління авіаційною діяльністю. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. 7(48). С. 15.64–15.79. <http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/issue/view/369>
12. SkyUp Airlines. Офіційний сайт авіакомпанії. URL: <https://skyup.aero/> (дата звернення: 24.03.2026).

Kovalenko N.O. PROBLEMS AND PROSPECTS OF DIGITAL TRANSFORMATION IN AVIATION MANAGEMENT: AN ENGINEERING-ECONOMIC AND ENGINEERING APPROACH

The article examines the problems and prospects of the development of digitalization of aviation activity management in the context of the transformation of the global air transport market, increasing competition, and growing requirements for the efficiency of aviation enterprises. It is substantiated that digitalization is a key instrument for ensuring the competitiveness of air transport entities, enhancing the flexibility of management processes, and adapting them to dynamic changes in the external environment. It is established that current trends in the industry are characterized by the active implementation of digital technologies, including decision support systems, automated information systems, digital platforms, big data processing technologies, and intelligent data analytics. The study analyzes the engineering and economic aspects of digitalization, which include evaluating the effectiveness of implementing digital solutions, optimizing costs, increasing resource productivity, and improving the quality of managerial decision-making.

It is substantiated that the application of engineering approaches ensures the systematic nature of digital transformation, facilitates the integration of technological and economic components, and enhances the validity of managerial decisions based on analytical models and forecasting. The role of digital tools in improving the efficiency of operational processes, resource management, planning activities, and ensuring the safety of air transportation is determined.

The scientific novelty of the study lies in the development and substantiation of a model for the integration of engineering-economic analysis and engineering solutions in the digital management of aviation activities, which ensures the alignment of technological, economic, and managerial components and the formation of well-grounded managerial decisions. It is proved that effective digital transformation requires a comprehensive approach that involves the coordination of engineering, economic, and organizational solutions. A conceptual approach to the digitalization of aviation activity management is proposed, based on the integration of engineering-economic analysis, modern information technologies, and engineering solutions into a unified digital management ecosystem.

The feasibility of using digital platforms and intelligent systems to enhance transparency, adaptability, and efficiency of aviation enterprise management is substantiated.

Keywords: digitalization, aviation activity management, aviation enterprise, engineering-economic analysis, engineering, digital transformation, information systems, efficiency, big data, automation.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 656.13
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/39>

Колодненко В.М.

<https://orcid.org/0000-0002-8450-6759>
Сумський національний аграрний університет

Таценко О.В.

<https://orcid.org/0000-0003-1762-8219>
Сумський національний аграрний університет

Волошко Т.П.

<https://orcid.org/0000-0003-2605-8836>
Сумський національний аграрний університет

Руденко В.А.

<https://orcid.org/0000-0001-7319-2451>
Сумський національний аграрний університет

Решетіло С.О.

<https://orcid.org/0009-0005-1620-6956>
Сумський національний аграрний університет

ЛОГІСТИЧНІ РИЗИКИ МІЖНАРОДНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА ШЛЯХИ ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

Досліджено сутність і специфіку логістичних ризиків міжнародних автомобільних перевезень в умовах зростаючої глобалізації, нестабільності зовнішнього середовища та посилення конкуренції на ринку транспортних послуг. Розкрито економічну природу ризиків, визначено їх основні види та джерела виникнення, зокрема операційні, фінансові, митні, правові, інфраструктурні, політичні та форс-мажорні чинники. Особливу увагу приділено впливу міжнародного регуляторного середовища, зокрема вимогам Європейського Союзу та нормам Міжнародного союзу автомобільного транспорту, на організацію та безпеку перевезень.

Запропоновано підходи до ідентифікації та комплексної оцінки логістичних ризиків із застосуванням якісних і кількісних методів аналізу, зокрема експертного оцінювання, статистичних методів та інструментів ризик-менеджменту. Обґрунтовано доцільність впровадження систем управління ризиками на підприємствах транспортної галузі з використанням цифрових технологій моніторингу, страхування вантажів, диверсифікації маршрутів і розвитку партнерських зв'язків.

Визначено практичні шляхи зниження рівня ризиків міжнародних автомобільних перевезень, серед яких удосконалення договірної роботи, підвищення кваліфікації персоналу, оптимізація логістичних процесів, впровадження сучасних інформаційних систем та розвиток міжнародної співпраці. Отримані результати можуть бути використані підприємствами транспортно-логістичної сфери для підвищення ефективності діяльності, мінімізації втрат і забезпечення стабільності міжнародних перевезень.

Ключові слова: логістичні ризики, міжнародні автомобільні перевезення, управління ризиками, оцінка ризиків, транспортно-логістична діяльність, ризик-менеджмент, мінімізація ризиків, страхування вантажів, митні процедури, цифровізація логістики.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку міжнародної торгівлі та інтеграції національних економік міжнародні автомобільні перевезення відіграють важливу роль у забезпеченні безперервності ланцюгів постачання. Водночас

функціонування транспортно-логістичних систем відбувається під впливом численних зовнішніх і внутрішніх чинників, що зумовлюють виникнення різноманітних логістичних ризиків. Зростання вимог до швидкості, надійності та безпеки

доставки вантажів, а також посилення регуляторних норм, зокрема в межах співпраці з Європейським Союзом, ускладнюють процес організації міжнародних автомобільних перевезень.

Додатковими джерелами ризиків виступають нестабільність геополітичної ситуації, зміни митного та податкового законодавства, коливання валютних курсів, зношеність транспортної інфраструктури, а також порушення умов контрактів учасниками перевезень. Недостатній рівень систематизації ризиків і відсутність комплексних підходів до їх оцінки та мінімізації знижують ефективність діяльності транспортних підприємств і підвищують імовірність фінансових втрат.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю теоретичного обґрунтування сутності логістичних ризиків міжнародних автомобільних перевезень, удосконалення методів їх оцінки та розроблення практичних заходів щодо зниження негативного впливу ризикових чинників на результати діяльності транспортно-логістичних підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження останніх років свідчать про зростання уваги до проблеми логістичних ризиків у міжнародних автомобільних перевезеннях, що пов'язано з підвищенням невизначеності зовнішнього середовища та необхідністю підвищення ефективності транспортно-логістичних систем.

У наукових публікаціях логістичні ризики розглядаються як комплекс взаємопов'язаних факторів, що впливають на функціонування міжнародних перевезень. Зокрема, виділяють операційні, фінансові, правові, політичні та екологічні ризики. Значна частина досліджень підкреслює необхідність системного підходу до їх ідентифікації, оскільки традиційні моделі не повною мірою враховують сучасні виклики глобальних ланцюгів постачання.

У працях з логістики останніх років дедалі частіше застосовуються кількісні методи аналізу, зокрема аналіз сценаріїв, моделювання ймовірності ризикових подій, багатокритеріальне оцінювання та методи штучного інтелекту для прогнозування ризиків. Використання цифрових технологій у ризик-менеджменті розглядається як перспективний напрям підвищення ефективності перевезень.

Окремі дослідження присвячені змінам у вимогах міжнародних організацій, зокрема Європейського Союзу та Міжнародного союзу автомобільного транспорту, що впливають на організацію логістичного циклу. У них підкреслюється важ-

ливість дотримання єдиних стандартів безпеки, митного контролю та цифрового обміну даними.

Практичний досвід впровадження систем управління ризиками у транспортних компаніях демонструє зниження втрат шляхом страхування вантажів, диверсифікації маршрутів та удосконалення договорів із партнерами. Результати цих досліджень підтверджують, що адаптація кращих практик міжнародних перевізників підвищує стабільність бізнес-процесів.

В українській науковій літературі проблема логістичних ризиків у міжнародних автомобільних перевезеннях також досліджується, проте здебільшого у контексті загального аналізу логістичних систем. Зокрема, відзначається недостатня кількість емпіричних досліджень, спрямованих на специфіку українських перевізників, врахування геополітичних ризиків та особливостей роботи малого і середнього бізнесу після 2022 року.

Серед ключових міжнародних досліджень виділяють роботу Тарельник Н. В. [1], яка аналізує класифікацію ризиків під час вантажних перевезень автомобільним транспортом, та роботу Дороша А. С. та ін. [2], що розглядає управління ризиками в умовах невизначеності оцінок. У дослідженні Бех П. В. та ін. [3] проведено систематичний огляд літератури щодо ризиків втрати вантажу, зокрема через затримки, неправильне маркування та умови перевезення. В українському контексті актуальними є дослідження, що аналізують ризики перевезення швидкопсувних вантажів в умовах воєнного стану [4].

Аналіз наукової літератури показує, що сучасні дослідження зосереджені на класифікації та систематизації логістичних ризиків, оцінці ризиків із використанням сучасних методів, врахуванні специфіки митного, операційного та зовнішнього середовища, а також на розробленні практичних рекомендацій для мінімізації втрат і забезпечення безпеки вантажів.

Останні публікації підтверджують, що розвиток теорії та практики управління логістичними ризиками є динамічним процесом, що потребує подальшого дослідження специфіки національних ринків та механізмів мінімізації ризиків для малого і середнього бізнесу в транспортно-логістичній сфері.

Постановка завдання. Метою статті є теоретичне узагальнення сутності логістичних ризиків міжнародних автомобільних перевезень, систематизація їх видів, удосконалення підходів до оцінювання та обґрунтування ефективних шляхів зниження негативного впливу ризикових

факторів на діяльність транспортно-логістичних підприємств.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань:

1. розкрити сутність та економічну природу логістичних ризиків, а також систематизувати й класифікувати їх основні види у сфері міжнародних автомобільних перевезень;

2. проаналізувати чинники формування логістичних ризиків в умовах сучасного функціонування міжнародних транспортних ринків;

3. дослідити методичні підходи до оцінки логістичних ризиків та визначити напрями їх удосконалення з використанням сучасних інструментів;

4. обґрунтувати напрями мінімізації ризиків і вдосконалення системи ризикам-менеджменту на транспортно-логістичних підприємствах.

Таким чином, дослідження спрямоване на формування комплексного підходу до управління логістичними ризиками міжнародних автомобільних перевезень із урахуванням сучасних економічних і регуляторних викликів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Логістичні ризики міжнародних автомобільних перевезень є складною економічною категорією, що відображає ймовірність виникнення несприятливих подій у процесі транспортування вантажів між країнами, які можуть призвести до фінансових втрат, порушення строків доставки, пошкодження або втрати вантажу, а також погіршення ділової репутації підприємства.

Особливістю міжнародних перевезень є багатofакторність впливів: різні правові системи, митні режими, валютні коливання, вимоги між-

народних угод та регламентів. У межах співпраці з країнами Європейський Союз перевізники повинні дотримуватися екологічних стандартів, норм робочого часу водіїв, правил каботажу та цифрового обліку перевезень, що також формує додаткові ризикові зони.

Таким чином, логістичний ризик у міжнародних автомобільних перевезеннях є наслідком невизначеності зовнішнього середовища та внутрішніх організаційних процесів, який впливає на ефективність транспортно-логістичної діяльності.

На основі узагальнення наукових підходів і практики міжнародних перевезень виділяють основні групи ризиків:

1. Операційні ризики.
2. Фінансові ризики.
3. Митно-правові ризики.
4. Інфраструктурні ризики.
5. Політичні та форс-мажорні ризики.

Систематизація ризиків дозволяє визначити найбільш критичні напрями впливу та сформулювати адекватні механізми реагування.

Серед ключових чинників формування логістичних ризиків варто виділити: глобалізацію ринків і розширення міжнародних ланцюгів постачання; цифровізацію транспортних процесів; посилення регуляторних вимог; нестабільність геополітичного середовища; інтеграційні процеси в межах міжнародних транспортних систем.

Важливу роль у регулюванні міжнародних автомобільних перевезень відіграє Міжнародний союз автомобільного транспорту, який формує стандарти перевезень, сприяє спрощенню митних процедур та впровадженню цифрових інструмен-



Рис. 1. Класифікація ризиків у міжнародних автомобільних перевезеннях

тів (зокрема системи eTIR). Недотримання міжнародних стандартів підвищує рівень операційних і правових ризиків.

Суттєвим чинником ризику є також залежність від зовнішніх ринків пального, що безпосередньо впливає на собівартість перевезень.

Оцінка ризиків у міжнародних автомобільних перевезеннях передбачає використання як якісних, так і кількісних методів.

Якісні методи: експертні оцінки; SWOT-аналіз; метод аналізу сценаріїв; ранжування ризиків за ступенем впливу.

Кількісні методи: статистичний аналіз імовірностей; розрахунок очікуваних фінансових втрат; побудова матриці ризиків; економіко-математичне моделювання.

Ефективним інструментом є побудова інтегрального показника ризику, який враховує імовірність події та величину потенційних втрат. Сучасні цифрові системи управління транспортом (TMS) дозволяють здійснювати моніторинг перевезень у режимі реального часу та оперативно реагувати на відхилення.

Для зниження рівня ризиків доцільно реалізувати комплекс організаційних, економічних і технологічних заходів:

Організаційні: удосконалення планування маршрутів; диверсифікація напрямків перевезень; підвищення кваліфікації персоналу.

Економічні: страхування вантажів; хеджування валютних ризиків; формування резервних фондів.

Технологічні: впровадження GPS-моніторингу; автоматизація документообігу; використання електронних митних декларацій.

Комплексний підхід до управління ризиками передбачає створення внутрішньої системи ризик-менеджменту на підприємстві, що включає постійну ідентифікацію, аналіз, контроль і моніторинг ризиків.

Для підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень доцільно інтегрувати управління ризиками у стратегічне планування підприємства, використовувати цифрові аналі-

тичні платформи для прогнозування ризиків, формувати партнерські мережі з надійними контрагентами, забезпечити відповідність міжнародним стандартам безпеки та якості перевезень.

Системний підхід до управління логістичними ризиками дозволяє мінімізувати фінансові втрати, підвищити конкурентоспроможність підприємств і забезпечити стабільність міжнародних автомобільних перевезень в умовах зростаючої невизначеності глобального середовища.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що логістичні ризики міжнародних автомобільних перевезень є багатофакторним явищем, яке формується під впливом операційних, фінансових, митно-правових, інфраструктурних та політичних чинників. Їх виникнення зумовлене високим рівнем невизначеності зовнішнього середовища, складністю міжнародного регуляторного простору та зростанням вимог до безпеки й швидкості доставки вантажів.

Систематизація ризиків дозволила виокремити ключові напрями їх прояву та визначити найбільш критичні зони впливу на діяльність транспортно-логістичних підприємств. Доведено, що ефективне управління ризиками потребує комплексного підходу, який поєднує якісні та кількісні методи оцінювання, використання економіко-математичних моделей, а також сучасних цифрових інструментів моніторингу перевезень.

Обґрунтовано, що зниження рівня логістичних ризиків можливе за умови впровадження системи ризик-менеджменту, яка передбачає постійну ідентифікацію, аналіз, контроль та мінімізацію потенційних загроз. Важливими напрямками є диверсифікація маршрутів, страхування вантажів, удосконалення договірної роботи, підвищення кваліфікації персоналу та автоматизація логістичних процесів.

Таким чином, реалізація запропонованих заходів сприятиме підвищенню ефективності міжнародних автомобільних перевезень, мінімізації фінансових втрат і забезпеченню стійкого розвитку транспортно-логістичних підприємств в умовах сучасних глобальних викликів.

Список використаної літератури

1. Тарельник Н. В. Класифікація ризиків при вантажних перевезеннях автомобільним транспортом. *Вісник Вінницького національного технічного університету*. 2021. № 4. С. 85–92. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-92-98>
2. Дорош А. С., Демченко Є. Б., Маркуль Р. В., Бердичевська Т. М. Аналіз ризиків при здійсненні міжнародних автомобільних перевезень вантажів. *Економічний вісник НТУУ «КПІ»*. 2020. № 17. С. 112–118. <https://doi.org/10.15802/tstt2020/217388>
3. Бех П. В., Лашков О. В., Огороков А. М., Заруба О. В. Прийняття рішень по організації автомобільних перевезень в умовах невизначеності оцінок. *Транспортні системи та технології перевезення*. 2025. № 30. С. 98–104. <https://doi.org/10.15802/tstt2025/340144>

4. Panjee P., Kaewchueaknang V., Amornsawadwatana S. A Systematic Literature Review of Cargo Loss Risks in Road Transportation: Impacts and Future Directions. *Safety*. 2025. № 11. P. 1–28. <https://doi.org/10.3390/safety11010020>
5. Дмитрів Д. В., Дмитрів О. Р., Репак О. М., Михайлишин Б. М. Оцінювання збитковості автомобільних перевезень швидкопсувних вантажів у міжнародному сполучення за умов блокади кордонів. *Галицький економічний вісник*. 2025. Том 87. № 2. С. 84–92. <https://galicianvisnyk.tntu.edu.ua/index.php?vol=yes&voll=87>
6. Колодненко В. М., Клещ О. В., Клименко Д. В. Комплексна класифікація вантажів як основа ефективної організації транспортних перевезень. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Том 1. № 4 (95). С. 193–199. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.25>
7. Савойський О. Ю., Таценко О. В., Соларьов О. О., Семірненко Ю. І., Саржанов О. А., Волошко Т. П. До питання обґрунтування типів автотransпортних засобів для вантажоперевезень у транспортних технологіях. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Том 1. № 1(92). С. 212–218. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.27>

Kolodnenko V.M., Tatsenko O.V., Voloshko T.P., Rudenko V.A., Reshetilo S.O. LOGISTICS RISKS OF INTERNATIONAL ROAD TRANSPORTATION AND WAYS OF THEIR MINIMIZATION

The essence and specific features of logistics risks in international road transportation under conditions of increasing globalization, instability of the external environment, and growing competition in the transport services market are investigated. The economic nature of risks is revealed, and their main types and sources are identified, including operational, financial, customs, legal, infrastructural, political, and force majeure factors. Particular attention is paid to the influence of the international regulatory environment, including the requirements of the European Union and the regulations of the International Road Transport Union, on the organization and safety of transportation.

Approaches to the identification and comprehensive assessment of logistics risks are proposed using qualitative and quantitative analysis methods, including expert evaluation, statistical methods, and risk management tools. The necessity of implementing risk management systems at transport enterprises with the use of digital monitoring technologies, cargo insurance, route diversification, and the development of partnership relations is substantiated.

Practical ways to reduce the level of risks in international road transportation are identified, including the improvement of contractual work, enhancement of personnel qualifications, optimization of logistics processes, implementation of modern information systems, and development of international cooperation. The obtained results can be used by transport and logistics enterprises to improve operational efficiency, minimize losses, and ensure the stability of international transportation.

Keywords: logistics risks, international road transportation, risk management, risk assessment, transport and logistics activities, risk management system, risk minimization, cargo insurance, customs procedures, digitalization of logistics.

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Решетков Д.М.

<https://orcid.org/0000-0001-7281-962X>

Одеський національний морський університет

Павлова Н.Л.

<https://orcid.org/0000-0001-7528-2370>

Одеський національний морський університет

ПРОБЛЕМИ ПЕРЕВАНТАЖЕНОСТІ МОРСЬКИХ ПОРТІВ

Порти вважаються ключовими воротами до національної економіки, оскільки транспортування вантажів морським шляхом залишається найпоширенішим способом здійснення міжнародної торгівлі. Вони функціонують як основні вузли та важливі ланки логістичних ланцюгів. З одного боку, їхня базова діяльність – завантаження та розвантаження вантажів – має вирішальне значення для забезпечення ефективності морської торгівлі та перевезень. З іншого боку, порти відіграють важливу роль завдяки тому, що їхня частка послуг істотно впливає на формування загальної вартості логістичного ланцюга. Унаслідок цього портові ресурси потребують більше часу та зусиль для повного задоволення потреб логістичних ланцюгів, невід'ємною складовою яких вони є. Однією з ключових проблем, що перешкоджають узгодженню між попитом з боку логістичних ланцюгів і пропозицією портових послуг, є явище перевантаженості портів. Проблема перевантаженості є однією з найважливіших, з якими стикається портова та судноплавна галузь у світовому масштабі. Виникнення заторів має негативний вплив як на загальну вартість транспортування, так і на продуктивність і ефективність роботи портів. Порти, які стикаються з такими проблемами, повинні оперативно реагувати протягом визначеного періоду часу з метою їх вирішення. В іншому випадку такі порти можуть втратити свої позиції у конкурентній боротьбі із сусідніми портами. Інтеграція передових технологій, включаючи автоматизацію та аналіз даних, покращення портової інфраструктури та розширення інтермодальних зв'язків між портами та наземними транспортними мережами є важливими кроками до вирішення цієї проблеми. Для науковців та фахівців з морської галузі дуже важливо глибоко розуміти явище перевантаженості портів, точно визначати його причини та знаходити найточніші рішення для вирішення та усунення ситуацій перевантаженості портів. У даній статті проаналізовано фактори, що викликають перевантаженість портів. Охарактеризовано негативні наслідки заторів у портах. Означені напрямки ефективного вирішення проблеми. Доведена необхідність глибокого розуміння перевантаженості портів для покращення інфраструктури та підвищення ефективності управління портами в Україні.

Ключові слова: ланцюжок поставок, перевантаженість морського порту, інфраструктура, пропускна здатність, продуктивність, оптимізація портових операцій.

Постановка проблеми. Однією з проблемних питань, що перешкоджають узгодженню між попитом з боку логістичних ланцюгів та пропозицією послуг портів, є явище перевантаженості. З цією проблемою стикається портова та судноплавна галузь у всьому світі [1]. Для її вирішення порти повинні оперативно вживати відповідних заходів. В іншому випадку вони можуть втратити свої конкурентні позиції порівняно з іншими портами, що негативно вплине на економічне зростання як окремих регіонів, так і країни в цілому [2].

Здатність точно визначати та прогнозувати причини проблемних ситуацій перевантаженості портів може допомогти розподілити існуючі портові ресурси в короткостроковій перспективі та оцінити важливість розвитку інфраструктури в довгостроковій перспективі, якщо проблема не зникне. Для науковців та фахівців з морської галузі дуже важливо глибоко розуміти явище перевантаженості портів, точно визначати його причини та знаходити найточніші рішення для вирішення та усунення ситуацій перевантаженості портів [3].

Успішне та ефективне управління проблемою перевантаженості портів має починатися з введення точного та вичерпного визначення проблеми. Таким чином, існує потреба у розробці стандартного визначення проблем перевантаженості портів, яке можна узагальнити на всі ситуації перевантаженості портів та використовувати як основу для визначення найпоширеніших причин проблеми, у тому числі, в морських портах України [4-5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема перевантаженості портів є предметом широкого кола досліджень у сфері експлуатації та управління портовими системами. Більшість із них зосереджується на двох ключових аспектах проблеми, а також на відповідних стратегіях її зменшення або усунення — з боку пропозиції та попиту. Підходи з боку пропозиції спрямовані на нарощування портових потужностей, зокрема причалів, перевантажувальної техніки та складської інфраструктури. Натомість підходи з боку попиту передбачають управління та регулювання вантажопотоків до портів з метою кращого узгодження попиту і пропозиції на портові ресурси. Водночас чинники, що зумовлюють перевантаженість портів, залишаються складними, багатовимірними та характеризуються просторово-часовою невизначеністю [4-10].

Однією з потенційних прогалин у наявній літературі є те, що більшість досліджень зосереджується переважно на діяльності портових операторів і судноплавних ліній у контексті вирішення проблеми перевантаженості. Водночас морські логістичні ланцюги охоплюють значно ширше коло зацікавлених сторін, зокрема митні органи, митні агентства, вантажовласників, транспортні компанії, державні інституції, постачальників логістичних послуг, а також механізми управління та регуляторну політику.

На функціонування морських логістичних ланцюгів також впливають зовнішні невизначені (неконтрольовані) чинники. Частина з них пов'язана з поведінковою невизначеністю, зокрема раптовими змінами обсягів міжнародної торгівлі (наприклад, сезонними коливаннями), тоді як інші зумовлені невизначеністю зовнішнього середовища, зокрема погодними умовами [11].

Постановка завдання. Метою статті є всебічний аналіз явища перевантаженості портів, спрямований на точне визначення його причин, а також на обґрунтування підходів до усунення таких ситуацій і розроблення стратегій зниження їхнього впливу.

Виклад основного матеріалу. Різноманітність причин перевантаженості створює різноманітність у визначенні явищ перевантаженості портів. Нижче наведено приклади визначень, що відображають різні підходи до трактування перевантаженості портів.

Перевантаженість порту – це:

- ситуація, коли судам доводиться тривалий час чекати на швартування та розвантаження, оскільки порт перевантажений більшою кількістю суден, ніж він може ефективно обробити;

- ситуація, коли судна стикаються із затримками при завантаженні чи розвантаженні вантажів через вузькі місця в портах;

- ситуація, коли судна не можуть швартуватися, вивантажуватися або занурюватися через інтенсивний рух та обмежену пропускну спроможність порту;

- коли кількість суден, які очікують навантаження чи розвантаження, перевищує можливості порту ефективно з ними справлятися;

- ситуація, коли кількість суден, які очікують навантаження або розвантаження, перевищує пропускну спроможність порту, що призводить до заторів та затримок;

- ситуація, коли судам доводиться тривалий час чекати на швартування та розвантаження, оскільки порт перевантажений більшою кількістю суден, ніж він може ефективно обробити;

- коли порт досягає своєї максимальної пропускну спроможності і не може обслуговувати вантажовідправників, що залишилися;

- коли обсяг вантажів перевищує його можливості ефективної обробки вантажів;

- ситуація, коли робота порту утруднена через надмірне судноплавство, обмежений простір на причалі або неадекватну інфраструктуру;

- коли морські порти стикаються з більшим обсягом вантажів, ніж можуть обробити, через різні фактори, такі як брак робочої сили, обмежена кількість обладнання та неефективні процеси;

- коли існуюча інфраструктура та операційні потужності порту недостатні для ефективного управління обсягом вантажів, що надходять.

Різноманітність у визначенні проблеми перевантаженості портів у літературі виникла через те, що причини цієї проблеми є складними та багатовимірними. Вони також відрізняються від країни до країни, а в деяких випадках навіть від порту до порту.

час очікування судна: його збільшення свідчить про вищий рівень завантаженості;

коефіцієнт зайнятості причалів: високі значення вказують на роботу порту на межі або понад межами його пропускної спроможності;

час обороту суден: зростання цього показника може свідчити про неефективність портових операцій;

пропускна спроможність: її динаміка може використовуватися для оцінювання рівня завантаженості порту.

Огляд літератури показує багато причин виникнення перевантаженості портів [6, 7, 12]. Усі ці можливі причини були зібрані з різних ситуацій та за різних умов. Укрупнено їх можна систематизувати і представити таким чином (рис. 1).

Причини перевантаженості портів		
Збільшення обсягу торгівлі	Збої в глобальних ланцюжках постачання	Неефективне управління та застарілі технології
Недостатня інфраструктура порту	Зміни у законодавчому регулюванні	Сезонні коливання та час пікових навантажень
Процес впровадження автоматизації та інтеграція технологій	Збільшення розмірів сучасних суден	Несприятливі погодні умови
Нестача робочої сили	Екологічні обмеження	Дефіцит чи стрибки цін на бункерне паливо
Одноразове прибуття великих суден судноплавних альянсів	Неефективне автомобільне, залізничне або внутрішнє водяне сполучення	Відмінності у робочому часі, святкових днях та умовах праці в портах по всьому світу

Рис. 1. Причини перевантаженості портів

Розуміння цих причин має вирішальне значення для розробки стратегій зниження їх впливу [4, 5].

Світова економіка демонструє стале зростання, що супроводжується збільшенням обсягів міжнародної торгівлі. У результаті порти обробляють значно більше вантажів, ніж раніше, нерідко перевищуючи власні пропускні можливості, що створює передумови для виникнення заторів.

Суттєвий вплив мають також збої в глобальних ланцюгах постачання, спричинені пандеміями, геополітичною напруженістю чи стихійними лихами. Такі події змінюють звичні маршрути та обсяги перевезень, викликаючи нерівномірне навантаження на окремі порти.

Проблема посилюється через недостатній рівень розвитку портової інфраструктури. Брак сучасних причалів, складських приміщень і технічного оснащення ускладнює ефективну обробку зростаючих вантажопотоків і призводить до затримок.

Не менш важливим чинником є нестача робочої сили. Страйки, наслідки пандемій або інші соціально-економічні обставини можуть обмежувати кількість працівників, необхідних для безперебійної роботи портів.

Хоча автоматизація та цифровізація покликані підвищити ефективність, на етапі впровадження вони іноді супроводжуються технічними збоями та недостатньою підготовкою персоналу, що тимчасово уповільнює операційні процеси.

Додаткові труднощі виникають унаслідок неефективного управління та недостатньої координації між учасниками портової діяльності. Використання застарілих технологій і недосконалих управлінських практик також негативно впливає на швидкість обробки вантажів.

Зміни у регуляторному середовищі, зокрема у сфері митного контролю чи екологічного законодавства, можуть створювати додаткові перешкоди. Посилення перевірок або запровадження нових процедур часто призводить до затримок у оформленні вантажів.

Важливу роль відіграє і якість транспортного сполучення з внутрішніми районами. Обмежена пропускна здатність автомобільних доріг, залізничних мереж чи внутрішніх водних шляхів ускладнює своєчасне вивезення контейнерів із портів.

Зростання розмірів сучасних суден також створює нові виклики. Великі контейнеровози потребують більше часу для обробки та спеціалізованої інфраструктури, якої не всі порти мають у достатній кількості.

Координація в межах судноплавних альянсів може призводити до одночасного прибуття кількох великих суден, що спричиняє пікові навантаження та перевантаження портових потужностей.

На роботу портів впливають і екологічні обмеження, спрямовані на зменшення негативного впливу на довкілля. Такі заходи можуть обмежувати інтенсивність портових операцій.

Несприятливі погодні умови, зокрема шторми, сильний туман або урагани, здатні тимчасово призупинити роботу портів, а подальше відновлення діяльності часто супроводжується накопиченням черг.

Сезонні коливання, особливо у періоди пікового попиту, наприклад перед святами, також спричиняють різке зростання вантажопотоку, до якого не всі порти готові.

Додатковий вплив мають зміни у доступності та вартості бункерного палива, що можуть змінювати маршрути суден і створювати додаткове навантаження на окремі порти.

Нарешті, відмінності у режимах роботи, святкових днях та трудових практиках у різних країнах призводять до неузгодженості графіків, що також може спричиняти затримки в обробці вантажів.

На підставі детального аналізу причин перевантаженості портів, представлених у попередніх дослідженнях, доцільно згрупувати їх за п'ятьма основними категоріями:

1) Природні причини. Зупинки та затримки в роботі портів, спричинені несприятливими погодними умовами, повеннями або припливами, призводять до накопичення суден і формування черг перед входом у порт. Такі чинники, за винятком припливів, зазвичай не залежать від діяльності портових операторів і користувачів портових послуг.

2) Економічні причини. Більшість світових портів функціонують на межі своєї фізичної пропускної спроможності, тому будь-яке раптове зростання обсягів морської торгівлі призводить до перевантаженості портів і створює додаткове навантаження на глобальні ланцюги постачання.

3) Технічні причини. До них належать як очевидні проблеми (поломки та нестача портового обладнання), так і менш явні — неефективна експлуатація та управління портовими ресурсами, а також недосконалість портової інфраструктури.

4) Політичні причини. Перевантаженість може бути зумовлена неефективною державною або портовою політикою та регуляторними обмеженнями, зокрема запровадженням надмірного митного контролю (наприклад, обов'язкової 100% інспекції вантажів). У країнах, що розвиваються, додатковими чинниками виступають неефективні управлінські практики, а також політика, що сприяє монополізації та бюрократизації державного сектору.

5) Соціальні причини. Зростання чисельності працівників у традиційних державних портах без відповідного підвищення продуктивності, а також посилення впливу портових профспілок можуть призводити до збільшення кількості страйків, зниження ефективності роботи портів і, як наслідок, посилення перевантаженості.

Слід зазначити, що більшість науковців розглядають явище перевантаженості портів як проблему, яка спричинена технічними проблемами [12]. Значна кількість портових інфраструктур не справляється зі зростаючими вимогами до обробки вантажів. Обмежений простір терміналів, нестача обладнання та постійна нестача робочої сили створюють вузькі місця в роботі портів. Розширення портової інфраструктури для ефективного задоволення зростаючого попиту — складне і дороге завдання, що часто ускладнюється бюрократичними перешкодами та екологічними міркуваннями (рис.2).

Технічні причини проблеми перевантаженості портів, які виявлені з наукової літератури та інших джерел	
Дефіцит, поломки та неефективна експлуатація портового обладнання	Погана та недостатня інфраструктура для порту або в країні в цілому
Неефективне управління портовими ресурсами	Неефективне управління вантажними операціями
Неефективне управління операціями "від судна до причалу"	Неефективне управління роботою портових воріт та доступом
Неефективне управління операціями штабелювання та зберігання вантажів	Неефективне управління експлуатацією портових ресурсів у країнах, що розвиваються

Рис. 2. Технічні причини проблеми перевантаження портів

Дефіцит, технічні несправності та неефективна експлуатація портового обладнання є важливими чинниками перевантаженості портів. Дослідження свідчать, що порти, оснащені застарілим або невідповідним обладнанням, частіше стикаються із затримками через його поломки та простої в операціях. Крім того, неефективне управління використанням обладнання може додатково загострювати проблему. Хоча автоматизація та цифровізація спрямовані на підвищення ефективності, на початкових етапах їх впровадження можливі тимчасові збої. Окремо зазначається, що дефіцит буксирних послуг істотно впливає на час очікування суден як на рейді, так і біля причалів.

Недостатній розвиток портової та суміжної інфраструктури також є вагомим фактором перевантаженості. У багатьох, особливо старих, портах обмежені площі для розміщення кранів, причалів і складів, відсутні можливості рейдової обробки суден, а також ускладнений зв'язок із внутрішніми районами через нерозвинену інфраструктуру, зокрема відсутність сухих портів. Водночас модернізація інфраструктури є дорогим і тривалим процесом.

Водночас значна кількість досліджень підкреслює, що ключовими причинами перевантаженості часто є не стільки обмеженість ресурсів, скільки неефективне управління та експлуатація наявних потужностей. Ефективне управління портом передбачає узгодження численних взаємопов'язаних рішень, зокрема щодо скорочення часу очікування суден, оптимізації використання обладнання, раціонального завантаження складських потужностей і зменшення заторів на підходах до порту.

Неефективне управління операціями «судно—причал» також сприяє виникненню заторів. Складність розподілу причалів зумовлена варіативністю часу прибуття суден, їх розмірів, характеристик причалів і продуктивності перевантажувального обладнання. За таких умов важливим

є досягнення балансу між мінімізацією часу очікування суден і ефективним використанням портових ресурсів.

Проблеми управління вантажними операціями проявляються у збільшенні часу обробки суден, що перевищує нормативні показники. Це призводить до затримок, особливо на контейнерних терміналах, і часто пов'язане з неефективним використанням технічних засобів.

Неефективне управління процесами штабелювання та зберігання вантажів також ускладнює роботу портів. Розподіл складських площ і організація переміщення техніки потребують прийняття складних управлінських рішень щодо оптимального розміщення вантажів і використання кранів та транспортних засобів. Недоліки в цих процесах призводять до накопичення вантажів і зростання затримок, особливо в контейнерних портах.

Окремою проблемою є неефективне управління роботою портових воріт і доступом до них. Дослідження пов'язують черги вантажівок із недостатньою пропускною спроможністю воріт, наявністю помилок у документації перевізників, а також низьким рівнем координації та обміну інформацією між учасниками портової діяльності.

Більшість досліджень проблеми перевантаженості портів у країнах, що розвиваються, дійшли тих самих вищезазначених результатів, хоча ефективно управління експлуатацією в цих країнах важко досягти. Погана підготовка портових працівників, відсутність схеми стимулювання, які пов'язують високу продуктивність праці з грошовими стимулами (як це застосовується в більшості портів розвинених країн) зазвичай призводять до зниження продуктивності та ефективності операцій.

Перевантаженість портів має значні наслідки, що впливають на різних учасників ланцюгів постачання – від портів і судноплавних компаній до кінцевих споживачів. (рис. 3).

Вплив перевантаженості портів	
Економічний вплив	Вплив на глобальні ланцюжки поставок
- Збільшення вартості доставки - Інфляційний тиск	- Затримки поставок - Дефіцит товарів та проблеми із запасами
Вплив на довкілля	Соціальний вплив
- Збільшення викидів - Відходи та використання ресурсів	- Проблеми з робочою силою - Вплив на спільноту

Рис. 3. Наслідки перевантаженості портів

Перевантаженість портів призводить до збільшення вартості доставки. Затримки в завантаженні та розвантаженні суден зумовлюють зростання зборів за простій. Поряд із цим, перевізники

можуть запроваджувати надбавки за перевантаженість з метою компенсації витрат, пов'язаних із затримками, які в підсумку перекладаються на споживачів.

Зростання витрат, пов'язане з перевантаженістю портів, спричиняє посилення інфляційного тиску. Підвищення вартості доставки веде до зростання цін на товари, що може мати каскадний ефект для економіки, зокрема спричиняти підвищення споживчих цін і зниження купівельної спроможності.

Одним із найбільш безпосередніх наслідків перевантаженості портів є затримки поставок. У разі накопичення товарів у портах виробники та роздрібні підприємства стикаються з дефіцитом, що призводить до збоїв у виробничих графіках і системах управління запасами. Це особливо критично для галузей, які використовують концепцію «точно в строк», за якої матеріали постачаються безпосередньо в момент їх використання у виробничому процесі.

Перевантаженість портів може призводити до дефіциту товарів і ускладнень в управлінні запасами, оскільки затримки поставок спричиняють вичерпання запасів у роздрібних продавців. Це не лише негативно впливає на обсяги продажів, але й завдає шкоди репутації компаній та рівню задоволеності споживачів. У відповідь підприємства змушені підтримувати вищі рівні запасів, що, своєю чергою, збільшує витрати на складування та зберігання.

Перевантаженість портів також сприяє зростанню викидів парникових газів. Судна, що простоюють у портах або обирають довші маршрути з метою уникнення перевантажених вузлів, споживають більше палива, що посилює забруднення повітря та негативно впливає на клімат. Водночас самі порти є значними джерелами викидів через інтенсивне використання важкої техніки та транспортних засобів.

Крім того, перевантаженість портів може зумовлювати збільшення обсягів відходів і підвищене використання ресурсів. Зокрема, швидкокопсувні товари можуть втрачати якість або псуватися внаслідок затримок, що призводить до додаткових втрат. Паралельно зростає навантаження на контейнери, портову інфраструктуру та інші ресурси.

Перевантаженість портів часто супроводжується ускладненнями у сфері трудових ресурсів, зокрема зростанням навантаження та тривалості робочого часу портових працівників. Це може спричиняти трудові конфлікти та страйки, що

додатково загострює проблему. В окремих випадках спостерігається також дефіцит робочої сили.

Вплив перевантаженості портів поширюється і на місцеві громади. Збільшення інтенсивності вантажоперевезень і рівня викидів може призводити до погіршення якості повітря та підвищення шумового навантаження. Разом з цим, зростання транспортної активності створює додатковий тиск на місцеву інфраструктуру та може спричиняти соціальні незручності для населення.

Негативний вплив перевантаженості на функціонування порту представлено на рис. 4.

Негативний вплив перевантаженості на роботу порту	
Зниження продуктивності	Операційна неефективність
Збільшення експлуатаційних витрат	Вплив на навколишнє середовище
Напружена інфраструктура	Невдоволення клієнтів

Рис. 4. Негативний вплив навантаження на роботу порту

Перевантаженість портів призводить до зниження продуктивності, оскільки затори уповільнюють обробку вантажів і негативно впливають на потоки в ланцюгах постачання.

Водночас вона спричиняє операційну неефективність: перенаправлення суден або коригування графіків ускладнюють процеси та знижують ефективність роботи.

Крім того, перевантаженість зумовлює зростання експлуатаційних витрат через залучення понаднормової праці, використання додаткового обладнання та простої суден.

Постійні затори створюють надмірне навантаження на портову інфраструктуру, що призводить до її прискореного зносу та потреби в частішому обслуговуванні.

Перевантаженість також негативно впливає на задоволеність клієнтів, особливо компаній, що працюють за принципом «точно вчасно».

Вона має і екологічні наслідки: зростання інтенсивності перевезень підсилює забруднення повітря та викиди парникових газів.

Вирішення проблеми перевантаженості є важливим для ефективності глобальної торгівлі та стабільності ланцюгів постачання. Портові адміністрації та оператори впроваджують різні підходи й інноваційні стратегії, спрямовані на її зниження. Більшість із них пов'язані з розвитком технологій, модернізацією інфраструктури та покращенням координації в ланцюгах постачання [4, 11, 13]. Аналіз теоретичних досліджень та практичного досвіду портової діяльності дозволяє виділити основні напрямки вирішення

проблеми перевантаженості морських портів (рис.5).

Напрямки вирішення проблеми перевантаженості портів	
Оптимізація портових операцій	Поліпшення інфраструктури
Моніторинг та оцінка ефективності	Впровадження технологій
Використання альтернативних портів	Впровадження екологічно чистих технологій
Оптимізація планування та координації	Поліпшення митних та оглядових процесів

Рис. 5. Напрямки вирішення проблеми перевантаженості портів

Значна частина запропонованих рішень спрямована на розвиток технологічних рішень, інфраструктури та покращення координації в ланцюгах постачання.

Збільшення пропускної спроможності портів за рахунок інвестицій в інфраструктуру, включаючи нові термінали, поглиблення та розширення судноплавних каналів і причалів, поліпшення причалів, оптимізацію планування порту шляхом створення спеціалізованих зон для певних типів вантажів, створення внутрішніх та сухих портів, а також модернізацію обладнання для інвестування в сучасне обладнання для обробки обробляють зростаючі обсяги вантажів через більші розміри судів і різке зростання світової торгівлі.

Оскільки розміри суден продовжують збільшуватися, портам часто доводиться вдосконалювати свою інфраструктуру для задоволення пропускної спроможності, що зростає. Зазвичай це передбачає інвестиції в днопоглиблення та модифікацію причальних споруд для розміщення суден із більшим осадом та більш важкого обладнання. Таким чином, відновлення застарілої інфраструктури може стати ефективним рішенням для прийому більших суден і збільшення пропускної спроможності порту.

З іншого боку, в умовах зростання кількості явищ, пов'язаних зі зміною клімату, стійка інфраструктура має вирішальне значення для захисту спільнот та екосистем, вимагаючи міцних конструкцій, здатних витримувати екстремальні погодні умови, повені та підвищення температури. Завдяки інтеграції сучасних матеріалів та адаптивних систем порти можуть скоротити витрати на відновлення, запобігти тривалим простоям та мінімізувати затори.

Один з найбільш ефективних способів боротьби з перевантаженістю – цифровізація портових операцій. Автоматизація, системи відстеження в реальному часі та передиктивна аналітика дозволяють оптимізувати обробку вантажів, скоротити час очікування та спростити взаємодію між зацікавлен-

ними сторонами. Прикладами таких технологій, що застосовуються в портах, є автоматизовані системи управління портовим обладнанням, обмін даними в реальному часі, інтегровані системи портового співтовариства (PCS) та передиктивна аналітика.

Зростання морських перевезень та поява мегасудів призвело до того, що порти стали концентрувати великомасштабні операції в часи пік, що створює велике навантаження на термінали та наземний транспорт. В даний час у великих європейських портах часто зустрічаються судна місткістю понад 18000 TEU, які можуть генерувати понад 6000 операцій, зосереджених у піковий годинник, що триває лише кілька годин. У таких ситуаціях порти все частіше продовжують час роботи та впроваджують системи попереднього запису для керування потоком вантажних автомобілів та запобігання вузьким місцям на терміналах.

Висновки. Перевантаженість портів багатогранна і створює серйозні проблеми для ефективного функціонування портів та всього ланцюжка поставок. Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу, включаючи інвестиції в інфраструктуру, технологічний прогрес, покращення координації між заінтересованими сторонами та стратегічне планування для пом'якшення негативного впливу на роботу портів та світову торгівлю.

Результати цього дослідження сприяють розумінню явища перевантаженості портів і надають практичні поради щодо підвищення ефективності роботи портів за допомогою технологічних інновацій та розвитку інфраструктури. Ці дані є можуть бути корисними для фахівців морської галузі, які прагнуть підвищити конкурентоспроможність портів України у світовому ланцюжку поставок.

Список літератури:

1. British Ports Association. Global container congestion affecting UK ports. 2021. URL: <https://www.britishports.org.uk/global-congestion> (дата звернення: 07.01.2026).
2. Ilmer M. Beating congestion by building capacity: An overview of new container terminal developments in Northern Europe. *Port Technology International*. 2006. № 28. P. 92-97.
3. Jiang C., Wan, Y. and Zhang A. Internalizing port congestion: the strategic impact of delays on shipping lines and the implications for terminal charges and investment. *Maritime Policy & Management*. 2017. Vol. 44, №1. P. 112-130. <https://www.doi.org/10.1080/03088839.2016.1237783>.
4. Meersman, H., Van de Voorde, E. and Vanelslander, T. Port congestion and the implications for maritime logistics. In *Maritime Logistics*. Emerald Group Publishing Limited. 2012. P. 49-68. <https://www.doi.org/10.1108/9781780523415-004>.
5. Eddrgash T. Port congestion problem, causes and solutions: PhD thesis. Cardiff University. 2022. URL: <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/156501> (дата звернення: 11.01.2026).
6. Guan, C.-Q. Analysis of marine container terminal gate congestion, truck waiting cost, and system optimization: PhD thesis. New Jersey Institute of Technology. 2009. URL: <https://digitalcommons.njit.edu/dissertations/902/> (дата звернення: 14.01.2026).
7. Islam, S. and Olsen, T.L. Factors affecting seaport capacity. in 19th international congress on modeling and simulation. *Perth, Western Australia*. 2011. P. 412-418.
8. Comaromi, A., Cerdeiro, D., Liu, Y. Supply chains and port congestion around the world. IMF Working Papers, March 25. 2022. URL: https://www.imf.org/-/media/files/publications/wp/2022/english/wpica20220_59-print-pdf.pdf (дата звернення: 18.01.2026).
9. Magibho, M. Analyzing the impact of port congestion on port performance: a case study of the Port of Dar es Salaam: PhD thesis. Open University of Tanzania. 2017. URL: <http://repository.out.ac.tz/2258> (дата звернення: 18.01.2026).
10. Mooney T., Janthur M. Global Port Congestion Analysis – Port Performance Program. S&P Global. 2025. URL: <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/research/global-port-congestion-analysis-port-performance-program/> (дата звернення: 22.01.2026).
11. Maguire A., Ivey S., Golias M. M., Lipinski M. E. Reducing congestion at intermodal maritime container terminals. Proceedings of the 51st Transportation Research Forum. Arlington. 2010. URL: <https://ideas.repec.org/p/ags/ndtr10/207280.html> (дата звернення: 20.01.2026).
12. Agostini, C.A., Saavedra, E.H. Chile: Port congestion and efficient rationing in cargo operations. *Cepal Review*. 2014. № 111. P. 123-143.
13. Maritime-executive. Port congestion: a long-term perspective. URL: <https://www.maritime-executive.com/article/Port-Congestion-Look-Long-Term-2014-09-29> (дата звернення: 29.01.2026).
14. Tully, W.K. and Ng, M. Port congestion in different service sectors. *Transportation Research. Part E: Logistics and Transportation Review*. 2016. № 94. P. 66-70.

Reshetkov D.M., Pavlova N.L. PROBLEMS OF OVERLOADING OF SEAPORTS

Ports are considered the main gateway to a country's economy, as sea freight remains the most common mode of international trade. They have become the main nodes and links in logistics chains. On the one hand, their main activity, loading and unloading of cargo, is crucial for maritime trade and transportation. On the other hand, ports are also very important because their share of services contributes significantly to the total value of the chain. As a result of these two reasons, port resources take longer to meet the needs of the logistics chains of which they are an integral part. One of the problematic issues that hinders the alignment between the demand from the logistics chains and the supply of port services is the phenomenon of congestion. The problem of congestion is one of the main problems faced by the port and shipping industry worldwide. Congestion will have a negative impact on both the total cost of transportation and the productivity and operation of ports. Ports that face these problems must act immediately within a certain period to solve them. Otherwise, these ports may lose their position in competition with neighboring ports. This will negatively affect the economic growth of the country and individual regions. It is very important for scientists and specialists in the maritime industry to deeply understand the phenomenon of port congestion, accurately determine its causes and find the most accurate solutions to solve and eliminate port congestion situations. This article analyzes the factors that cause port congestion. The negative consequences of port congestion are characterized. The directions for effective problem solving are indicated. The need for a deep understanding of port congestion is proven to improve infrastructure and increase the efficiency of port management in Ukraine.

Keywords: supply chain, seaport congestion, infrastructure, throughput, productivity, port operations optimization.

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Соколова О.Є.

<https://orcid.org/0000-0001-6341-0195>

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Борець І.В.

<https://orcid.org/0000-0002-4477-4716>

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ВАНТАЖІВ В АЕРОПОРТОВОМУ ВУЗЛІ ІНТЕГРОВАНОЇ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Сучасні транспортно-логістичні процеси характеризуються підвищеними вимогами до швидкості, надійності та економічної ефективності перевезень вантажів при одночасному збереженні їх фізичних характеристик та мінімізації негативного впливу на довкілля. У цих умовах ключового значення набувають інтегровані транспортно-логістичні системи (ІТЛС), у межах яких аеропорт виступає системоутворювальним вузлом, що забезпечує узгодженість, синхронізацію та координацію взаємодії різних видів транспорту. Ефективність функціонування аеропортового вузла визначається збалансованістю економічних, часових та екологічних параметрів, що зумовлює необхідність застосування підходів до оптимізації процесів обробки вантажів. Встановлено, що існуючі наукові підходи переважно орієнтовані на окремі аспекти функціонування авіатransпортних систем та не забезпечують цілісної формалізації взаємодії різних видів транспорту в аеропортових вузлах.

У даній статті розроблено багатокритеріальну економіко-математичну модель оптимізації процесів взаємодії автомобільного, залізничного та авіаційного видів транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС з урахуванням економічних витрат, тривалості технологічних процесів обробки вантажів та екологічного навантаження. Модель побудована на основі поєднання методів багатокритеріальної оптимізації, теорії масового обслуговування та сценарного аналізу, що дозволяє оцінювати інтенсивність вантажопотоків, продуктивність вантажних фронтів, а також визначати параметри складської підсистеми в залежності від технологічних обмежень конкретного аеропортового вузла. Під час обчислювального експерименту встановлено, що зміна пріоритетів інтегрального критерію оптимізації суттєво впливає на структуру використання ресурсів системи обробки вантажів, тривалість технологічних операцій, економічні витрати та рівень екологічного навантаження. На основі Парето-аналізу визначено область найбільш ефективних рішень, що відповідає інтервалу витрат 18–26 тис. євро при середній тривалості обробки вантажів від 15 до 17 год.

Отримані результати апробації запропонованого підходу підтверджують можливість використання розробленої моделі для визначення оптимальних параметрів процесів взаємодії різних видів транспорту під час обробки вантажів та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Подальшим напрямом наукового дослідження має стати розробка імітаційної моделі оптимізації взаємодії авіаційного та наземних видів вантажного транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС.

Ключові слова: інтегрована транспортно-логістична система, аеропортовий вузол, взаємодія видів транспорту, обробка вантажів, багатокритеріальна оптимізація, економіко-математична модель, сценарний аналіз.

Постановка проблеми. Інтеграційні процеси в транспортній сфері набувають особливої актуальності в умовах зростання обсягів перевезень, ускладнення просторово-часових характеристик логістичних операцій та підвищення вимог до техніко-технологічної узгодженості функціонування транспортних вузлів. Унаслідок цього відбувається

поступовий перехід від ізолюваного функціонування окремих видів транспорту до формування інтегрованих транспортно-логістичних систем (ІТЛС), у межах яких забезпечується узгодженість інфраструктури, рухомого складу та потокових процесів. Формування ІТЛС відбувається на основі взаємопов'язаної мережі транспортних вузлів та

маршрутів, у якій розподіл вантажопотоків здійснюється у динамічному середовищі під впливом значної кількості факторів, серед яких ключове значення мають нерівномірність попиту, ресурсні обмеження, випадкові збої та невизначеність середовища, а також екологічні вимоги. За таких умов необхідним є встановлення стійких техніко-технологічних та організаційно-управлінських взаємозв'язків, що забезпечують зниження витрат, скорочення тривалості перевезень та мінімізацію екологічного навантаження на всіх етапах логістичного ланцюга.

Вузлові елементи ІТЛС виконують функції концентрації, перерозподілу та трансформації вантажопотоків, визначаючи ефективність функціонування всієї системи. При цьому, особливу роль виконують аеропортові комплекси, забезпечуючи інтеграцію авіаційного транспорту з наземними видами у глобальних мультимодальних ланцюгах постачання. Тому, від того, наскільки ефективно організовані процеси обробки вантажів та взаємодії видів транспорту в аеропорту безпосередньо залежать загальні витрати, тривалість логістичного циклу та екологічні показники функціонування всієї ІТЛС.

Залучення авіаційного транспорту до логістичних схем перевезень створює можливості для суттєвого прискорення переміщення вантажів на значні відстані та формування високошвидкісних міжнародних ланцюгів постачання. Але при цьому, така інтеграція змінює структуру потоків, впливає на рівень запасів, параметри обслуговування та величину сукупних витрат, що призводить до трансформації просторово-часової конфігурації системи. Завдяки цьому аеропортовий вузол виступає не лише інфраструктурним елементом, а й стає системоутворювальним компонентом, який визначає напрям розвитку ІТЛС.

Зростання інтенсивності перевезень із використанням авіаційного транспорту супроводжується підвищенням вимог до енергоефективності, ресурсозбереження та екологічної безпеки, що в поєднанні з активним впровадженням принципів сталого розвитку в транспортному секторі зумовлює необхідність забезпечення балансу між економічною ефективністю, соціальною відповідальністю та мінімізацією впливу на довкілля. У зв'язку з цим під час планування та оптимізації процесів обробки вантажів доцільно враховувати не лише вартісні та часові параметри, а й екологічні та ресурсні обмеження.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розроблення методологічних підходів до

оптимізації процесів обробки вантажів в аеропортових комплексах із урахуванням часових характеристик, витрат, інфраструктурних обмежень та екологічних вимог, що обґрунтовує доцільність застосування багатокритеріального підходу для прийняття управлінських рішень, спрямованих на підвищення ефективності функціонування ІТЛС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам функціонування інтегрованих транспортно-логістичних систем та ролі аеропортів у їх структурі присвячено значну кількість наукових досліджень. Зокрема, у працях Полатера А., Тоєта А, Лі Х., Янга Х.М., Венгліньського Б., Акімової Т.А. та інших науковців аеропортові комплекси розглядаються як ключові логістичні центри та мультимодальні транспортні хаби, що забезпечують інтеграцію різних видів транспорту та формування ефективних ланцюгів постачання з авіаційною складовою [1-7]. Значну увагу дослідники приділяють стратегічним аспектам розвитку аеропортових вузлів, підвищенню їх конкурентоспроможності та формуванню стійких транспортно-логістичних систем.

Питання планування та оптимального розміщення аеропортових хабів досліджуються такими вченими як Чжен Ю., Хатіпоглу С., Ватанабе Д., Чжоу С.С., Макнейра А.В. та ін. [8-12], праці яких спрямовані на вирішення задач щодо вибору місця розташування, формування транспортних мереж та інтеграції аеропортів у мультимодальні транспортні системи.

Вагоме місце у розв'язанні транспортних проблем займають дослідження, присвячені оптимізації та моделюванню основних процесів функціонування аеропортів. Зокрема, у роботах Ду Х., Цю Ц., П'єр Еролес М. [13-15] запропоновано інструменти координації транспортних потоків, а також визначення оптимальних параметрів роботи аеропортових комплексів за окремими видами його діяльності, зокрема із застосуванням імітаційного моделювання. Проте, зазначені наукові праці мають вузькоспеціалізований характер та не враховують особливостей взаємодії різних видів транспорту в межах аеропорту.

У контексті сталого розвитку та декарбонізації транспортної галузі особливого значення набувають екологічні аспекти функціонування транспортних систем та аеропортових комплексів. Аналіз наукових праць за цією тематикою свідчить, що більшість досліджень зосереджено переважно на оцінюванні впливу транспортної діяльності на довкілля, визначенні обсягів викидів забруднюючих речовин та розробці методичних

підходів щодо їх зменшення [16,17]. Разом з тим, інтеграція екологічних показників, з у комплексні моделі оптимізації процесів взаємодії видів транспорту залишається не достатньо вивченими.

Таким чином, за результатами проведеного аналізу останніх наукових досліджень та публікацій встановлено, що вітчизняні та зарубіжні вчені зробили значний внесок у розвиток теоретичних основ управління транспортно-логістичними системами та потоками, формування мультимодальних ланцюгів постачання та забезпечення ефективності функціонування транспортно-логістичних вузлів, зокрема авіаційних. Але при цьому, питання щодо комплексного врахування економічних, часових та екологічних чинників у задачах оптимізації взаємодії видів транспорту в аеропортових вузлах мають фрагментарний характер, і тому потребують подальшого дослідження.

Постановка завдання. Метою статті є удосконалення теоретико-методологічних положень багатокритеріальної оптимізації процесів обробки вантажів в умовах взаємодії наземного та авіаційного видів транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС на основі розроблення економіко-математичної моделі, що дозволяє мінімізувати вартісні, часові та екологічні показники його функціонування з урахуванням інфраструктурних та технологічних обмежень.

Виклад основного матеріалу. Аеропортовий вузол у структурі ІТЛС виступає ключовою ланкою мультимодального ланцюга, через яку здійснюється перерозподіл вантажопотоків між наземним та авіаційним транспортом, причому саме на його території відбувається концентрація, накопичення, обробка та підготовка вантажів до подальшого перевезення, що зумовлює системний характер наслідків будь-яких збоїв у його функціонуванні, які проявляються у зростанні витрат, збільшенні тривалості доставки та погіршенні екологічних показників у межах усього логістичного ланцюга. Ефективність функціонування такого вузла на практиці обмежується сукупністю взаємопов'язаних факторів, серед яких невідповідність технологічних параметрів різних видів транспорту, дисбаланс потужностей інфраструктурних об'єктів, неузгодженість графіків руху, нерівномірне завантаження складських зон, а також обмеженість ресурсів для виконання навантажувально-розвантажувальних робіт (НРР), що призводить до формування «вузьких місць», уповільнення руху вантажів та зниження ефективності як окремих ланцюгів постачання, так і системи в цілому.

Стохастичний характер надходження вантажів у поєднанні з варіативністю тривалості технологічних операцій зумовлює випадковість процесів їх обробки в аеропортовому вузлі, що обґрунтовує доцільність застосування відповідного математичного апарату для їх формалізації, зокрема теорії систем масового обслуговування (СМО), у межах якої аеропортовий вузол може бути розглянутий як багатоканальна система з очікуванням, параметри якої визначаються інтенсивністю надходження вантажів, швидкістю їх обробки та кількістю каналів обслуговування.

Представлення аеропортового вузла у вигляді багатоканальної СМО дозволяє формалізувати процес надходження вантажів через інтенсивність вхідного потоку λ (середня кількість заявок або транспортних одиниць, що надходять до системи за одиницю часу); оцінювати та прогнозувати затримки в чергах, які виникають у разі невідповідності між інтенсивністю надходження λ та продуктивністю обслуговування μ , а також контролювати стійкість функціонування вузла через рівень завантаження каналів s [18-19].

Подальший аналіз параметрів функціонування аеропортового вузла здійснюється із застосуванням методів економіко-математичного моделювання, у межах якого задача багатокритеріальної оптимізації формалізується у вигляді моделі змішаного цілочисельного нелінійного програмування із заданою цільовою функцією та системою обмежень.

Початковим етапом постановки оптимізаційної задачі є формування вектора керованих змінних X , який відображає інтенсивності вантажопотоків та параметри ресурсного забезпечення вантажних фронтів різних видів транспорту в аеропортовому вузлі:

$$X = \{\lambda_{\text{авт},i}, \lambda_{\text{зал},i}, \lambda_{\text{авіа},i}, n_{\text{авт}}, n_{\text{зал}}, n_{\text{авіа}}, n_{\text{конт}}\}; \quad (i=1, \dots, m), \quad (1)$$

де, $\lambda_{\text{авт},i}, \lambda_{\text{зал},i}$ – інтенсивність надходження до аеропортового вузла i -го виду вантажу автомобільним та залізничним транспортом відповідно, т/год.; $\lambda_{\text{авіа},i}$ – інтенсивність завантаження i -го виду вантажу на повітряні судна (ПС), т/год.; – кількість механізованих навантажувально-розвантажувальних пунктів автомобільного транспорту; $n_{\text{зал}}$ – кількість механізованих вантажних фронтів залізничного транспорту; $n_{\text{авіа}}$ – кількість місць стоянок вантажних ПС, оснащених перонними засобами механізації; $n_{\text{конт}}$ – кількість механізованих контейнерних майданчиків.

Далі на основі вектора керованих змінних, формується цільова функція оптимізації, яка спрямована на мінімізацію інтегрального критерію

ефективності взаємодії різних видів транспорту в процесі обробки вантажів в аеропортовому вузлі ІТЛС, структура якого визначається економічною, часовою та екологічною складовими.

Враховуючи необхідність одночасного врахування витрат, тривалості обробки вантажів та екологічних наслідків, що виникають під час виконання технологічних операцій, задача оптимізації набуває багатокритеріального характеру, у зв'язку з чим для її практичного розв'язання узагальнений інтегральний критерій ефективності $F(X)$ подається у вигляді зваженої суми нормованих часткових показників:

$$F(X) = \omega_{\text{екон}} \tilde{f}_{\text{екон}}(X) + \omega_{\text{час}} \tilde{f}_{\text{час}}(X) + \omega_{\text{екол}} \tilde{f}_{\text{екол}}(X) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $\tilde{f}_{\text{екон}}(X), \tilde{f}_{\text{час}}(X), \tilde{f}_{\text{екол}}(X)$ – нормовані в інтервалі $[0;1]$ часткові критерії, що характеризують відповідно економічну, часову та екологічну складові ефективності взаємодії різних видів транспорту у процесі обробки вантажів в аеропортовому вузлі ІТЛС; $\omega_{\text{екон}}, \omega_{\text{час}}, \omega_{\text{екол}}$ – вагові коефіцієнти пріоритетності часткових критеріїв, визначені за методом аналізу ієрархій Т. Сааті ($\sum_{j=1}^3 \omega_j = 1$); X – вектор керованих змінних моделі.

Сукупні витрати, що виникають у процесі обробки вантажів та взаємодії різних видів транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС, відображаються економічною складовою $f_{\text{екон}}(X)$ інтегрального критерію ефективності $F(X)$, що визначається за такою формулою:

$$f_{\text{екон}}(X) = \sum_{i=1}^m (C_{\text{оч,авт}} \lambda_{\text{авт},i} + C_{\text{оч,зал}} \lambda_{\text{зал},i}) + C_{\text{експл,авт}} n_{\text{авт}} + C_{\text{експл,зал}} n_{\text{зал}} + C_{\text{експл,авіа}} n_{\text{авіа}} + C_{\text{експл,конт}} n_{\text{конт}} + C_{\text{скл,зб}} \int_0^T Q_i(t) dt, \quad (3)$$

де $C_{\text{оч,авт}}, C_{\text{оч,зал}}$ – питомі витрати перебування автомобіля та вагона в системі очікування, грош. од./год.; $C_{\text{експл,авт}}, C_{\text{експл,зал}}, C_{\text{експл,авіа}}, C_{\text{експл,конт}}$ – вартість однієї години експлуатації наземних засобів механізації на автомобільному, залізничному, авіаційному та контейнерних вантажних фронтах аеропортового вузла; $C_{\text{скл,зб}}$ – питома вартість зберігання однієї тони вантажу на складі, грош. од./т/год.; $Q_i(t)$ – обсяг i -го виду вантажу на складі в момент часу t , т; $\int_0^T Q_i(t) dt$ – запас i -го виду вантажу, що знаходиться на складі упродовж операційного періоду, т; T – тривалість операційного періоду зберігання вантажу на складі до моменту завершення формування авіаційної партії, год.

Часова складова $f_{\text{час}}(X)$ інтегрального критерію ефективності $F(X)$ характеризує сумарну тривалість перебування вантажів та транспортних засобів у системі обробки аеропортового вузла ІТЛС, що охоплює як виконання вантажних опе-

рацій, так і процеси взаємодії різних видів транспорту:

$$f_{\text{час}}(X) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{Q_{\text{парт},i}} \int_0^T Q_i(t) dt + \frac{Q_{\text{парт},i}}{P_{\text{ПС}}} \right) + \sum_{k=1}^4 (t_{\text{оч},k} + t_{\text{пр},k}), \quad (4)$$

де $t_{\text{оч},k}$ – середній час очікування транспортної одиниці в черзі на k -му вантажному фронті, год.; $t_{\text{пр},k}$ – середній час виконання НРР на k -му вантажному фронті, год.; $Q_{\text{парт},i}$ – обсяг i -го виду вантажу в одній авіаційній партії, т; $P_{\text{ПС}}$ – загальна пропускна спроможність фронту завантаження ПС, т/год. (обчислюється як сума продуктивностей окремих місць завантаження ПС, т/год.).

Значення екологічної складової $f_{\text{екол}}(X)$ інтегрального критерію ефективності $F(X)$ визначається на основі сумарного обсягу викидів забруднюючих речовин, що виникають унаслідок роботи транспортних засобів у режимі очікування, функціонування засобів механізації, задіяних у НРР, експлуатації складської інфраструктури, а також виконання операцій наземного обслуговування ПС на пероні, таким чином:

$$f_{\text{екол}}(X) = \sum_{i=1}^m (e_{\text{оч,авт}} \lambda_{\text{авт},i} + e_{\text{оч,зал}} \lambda_{\text{зал},i}) + e_{\text{пр}} (n_{\text{авт}} + n_{\text{зал}} + n_{\text{авіа}} + n_{\text{конт}}) + e_{\text{скл}} S_{\text{скл}} + e_{\text{пер}} \sum_{i=1}^m Q_{\text{перт},i}, \quad (5)$$

де $e_{\text{оч,авт}}, e_{\text{оч,зал}}$ – питомі викиди забруднюючих речовин від роботи двигунів автомобільного транспорту та маневрових локомотивів в режимі очікування, кг/год.; $e_{\text{пр}}$ – питомі викиди забруднюючих речовин від роботи одного механізму НРР (навантажувачів, тягачів та іншої техніки наземного обслуговування), кг/год.; $e_{\text{скл}}$ – питомі викиди забруднюючих речовин, пов'язані із функціонуванням складської інфраструктури (енергоспоживання систем освітлення, вентиляції та клімат-контролю) кг/(м²/год.); $S_{\text{скл}}$ – площа складської зони аеропортового вузла ІТЛС, м²; $e_{\text{пер}}$ – питомі викиди забруднюючих речовин, що виникають під час наземного обслуговування ПС на пероні аеропорту, кг/рейс.

Формування вихідного вантажопотоку в межах складської підсистеми визначається співвідношенням інтенсивностей надходження та вибуття вантажів, що дозволяє формалізувати процес трансформації вхідних потоків у вихідні за допомогою рівняння матеріального балансу:

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = \lambda_{\text{авт},i}(t) + \lambda_{\text{зал},i}(t) - \lambda_{\text{авіа},i}(t), \quad (6)$$

де $\frac{dQ_i(t)}{dt}$ – швидкість зміни запасу i -го виду вантажу на складі, т/год.

Умови, що визначають початковий стан складської підсистеми та момент завершення формування авіаційної партії, задаються таким чином:

$$Q_i(0) = Q_{0,i}, \quad (7)$$

$$Q_i(T) = Q_{\text{парт},i}, \quad (8)$$

де, $Q_{0,i}$ – обсяг і-го виду вантажу, що перебуває на складі аеропортового вузла на початку розрахункового періоду, т; $Q_{\text{парт},i}$ – обсяг і-го виду вантажу в одній авіаційній партії, т

Перевірка відповідності моделі технологічним обмеженням системи проводиться шляхом зіставлення пропускної спроможності вантажних фронтів з інтенсивностями надходження транспортних одиниць, які визначаються через співвідношення інтенсивності вантажопотоку та середньої маси вантажу в одній транспортній одиниці:

$$\lambda_{\text{авт},i}^{\text{од}} = \frac{\lambda_{\text{авт},i}}{q_{\text{авт}}}, \quad (9)$$

$$\lambda_{\text{зал},i}^{\text{од}} = \frac{\lambda_{\text{зал},i}}{q_{\text{зал}}}, \quad (10)$$

$$\lambda_{\text{конт},i}^{\text{од}} = \frac{\lambda_{\text{конт},i}}{q_{\text{конт}}}, \quad (11)$$

де, $\lambda_{\text{авт},i}^{\text{од}}$ – інтенсивність надходження автомобілів з вантажем і-го виду до автомобільного вантажного фронту аеропортового вузла, од./год.; $\lambda_{\text{зал},i}^{\text{од}}$ – інтенсивність надходження рухомого складу з вантажем і-го виду до залізничного вантажного фронту аеропортового вузла, од./год.; $\lambda_{\text{конт},i}^{\text{од}}$ – інтенсивність надходження контейнерів з вантажем і-го виду на механізовані контейнерні майданчики аеропортового вузла, од./год.; $q_{\text{авт}}, q_{\text{зал}}, q_{\text{конт}}$ – середня маса вантажу в одному автомобілі, вагоні та контейнері відповідно, т.

Розрахунок годинної продуктивності одного каналу виконання НРР μ_k та пропускної спроможності відповідного вантажного фронту P_k здійснюється за такими залежностями:

$$\mu_k = \frac{1}{t_{\text{пр},k}}, \quad (12)$$

$$P_k = n_k \mu_k q_k, \quad (13)$$

де $t_{\text{пр},k}$ – середній час виконання НРР на k -му вантажному фронті, год.; n_k – кількість механізованих каналів виконання НРР на k -му вантажному фронті ($n_{\text{авт}}, n_{\text{зал}}, n_{\text{конт}}$); q_k – середня маса вантажу, що припадає на одну транспортну одиницю, яка обробляється на k -му вантажному фронті, т; P_k – годинна пропускна спроможність k -го вантажного фронту за обсягом обробленого вантажу, т/год.

Вимога технологічної стійкості функціонування аеропортового вузла ІТЛС під час виконання вантажних операцій та взаємодії різних

видів транспорту передбачає, що коефіцієнт завантаження кожного вантажного фронту ρ_k не повинен перевищувати одиницю:

$$\rho_k = \frac{\lambda_k^{\text{од}}}{n_k \mu_k} < 1, \quad (14)$$

де $\lambda_k^{\text{од}}$ – інтенсивність надходження транспортних одиниць до k -го вантажного фронту, од./год.; – кількість механізованих каналів виконання НРР на k -му вантажному фронті ($n_{\text{авт}}, n_{\text{зал}}, n_{\text{конт}}$); μ_k – годинна продуктивність одного каналу виконання НРР, од./год.

Умова $\rho_k < 1$ забезпечує технологічну стійкість системи обробки вантажів, що досягається за перевищення інтенсивності обслуговування транспортних одиниць над інтенсивністю їх надходження до відповідного вантажного фронту.

Обчислення середнього часу очікування транспортної одиниці в черзі перед початком обслуговування на k -му вантажному фронті $t_{\text{оч},k}$ здійснюється за такою залежністю:

$$t_{\text{оч},k} = \frac{\rho_k \pi_{\text{чер},k}}{\lambda_k^{\text{од}} (1 - \rho_k)}, \quad (15)$$

де $\pi_{\text{чер},k}$ – ймовірність наявності черги у системі обслуговування k -го вантажного фронту аеропортового вузла.

Формування системи обмежень виконується на завершальному етапі моделювання та спрямоване на визначення допустимої області значень керованих змінних з урахуванням технологічних та просторових можливостей основних елементів аеропортового вузла ІТЛС, що забезпечують узгоджену взаємодію різних видів транспорту під час обробки вантажів:

$$X \in \Omega: \left\{ P_{\text{контр}} \geq \sum_{i=1}^m \lambda_{\text{авт},i}^{\text{од}}; L_{\text{фронт}} \geq n_k l_{\text{норм}}; \sigma \sum_{i=1}^m Q_i(t) \leq S_{\text{скл}}; \sum_{i=1}^m Q_{\text{парт},i} \leq G_{\text{пс}} \right\}, \quad (16)$$

де $P_{\text{контр}}$ – годинна пропускна спроможність зони безпекового та митного контролю вантажів аеропортового вузла ІТЛС, т/год; $L_{\text{фронт}}$ – загальна довжина вантажних фронтів аеропортового вузла ІТЛС, м; $l_{\text{норм}}$ – нормативна довжина вантажного фронту, необхідна для обслуговування однієї транспортної одиниці, м; σ – питомий норматив складської площі для зберігання однієї тони вантажу, м²/т.

З метою підтвердження науково-практичної цінності запропонованої моделі у даній роботі проведено експериментальні розрахунки інтегрального критерію ефективності взаємодії різних видів транспорту під час обробки вантажів в аеропортовому вузлі ІТЛС у програмному середовищі MATLAB за трьома стратегіями розвитку (S1 – мінімізація витрат; S2 – мінімізація часу;

S3 – мінімізація екологічного навантаження) та при різних значеннях добової потужності – 120 т/добу, 240 т/добу та 480 т/добу). Вагові коефіцієнти ω_j , що відображають відносну важливість економічних, часових та екологічних складових інтегрального коефіцієнту ефективності, визначені експертним шляхом із застосуванням методу аналізу ієрархій Т. Сааті [20-21].

На рис. 1 показано зміну значень інтегральної цільової функції $F(X)$ та її складових за різними сценаріями функціонування аеропортового вузла ІТЛС залежно від його потужності.

Результати розрахунків свідчать, що зі зростанням пропускної спроможності аеропортового вузла ІТЛС від 120 до 480 т/добу відбувається збільшення кількості каналів виконання НРР на всіх вантажних фронтах, що забезпечує підвищення інтенсивності обробки вантажів, тоді як динаміка зміни середнього часу очікування транспортних засобів у системі істотно залежить від обраної стратегії оптимізації.

У межах стратегії мінімізації витрат збільшення потужності вузла та кількості каналів

обслуговування супроводжується скороченням середнього часу очікування транспортних засобів з 1,33 до 0,4 год, однак використання мінімально необхідного ресурсного забезпечення зумовлює зростання тривалості технологічного циклу при підвищенні інтенсивності вантажопотоку, що призводить до утворення черг, підвищення екологічного навантаження та погіршення значення інтегрального критерію ефективності $F(X)$, яке змінюється від 0,39 до 0,71.

Для стратегії мінімізації часу характерним є збільшення кількості каналів обслуговування з метою підвищення пропускної спроможності системи, що дозволяє суттєво скоротити тривалість логістичного циклу обробки вантажів і зменшити середній час перебування транспортних засобів у системі з 26,36 до 11,50 год, проте супроводжується зростанням експлуатаційних витрат майже на 38% (з 18446 до 25459 євро) внаслідок використання додаткової техніки, тоді як скорочення часових параметрів за сценаріями S2.1–S2.3 забезпечує покращення значення інтегрального критерію $F(X)$ з 0,47 до 0,34.

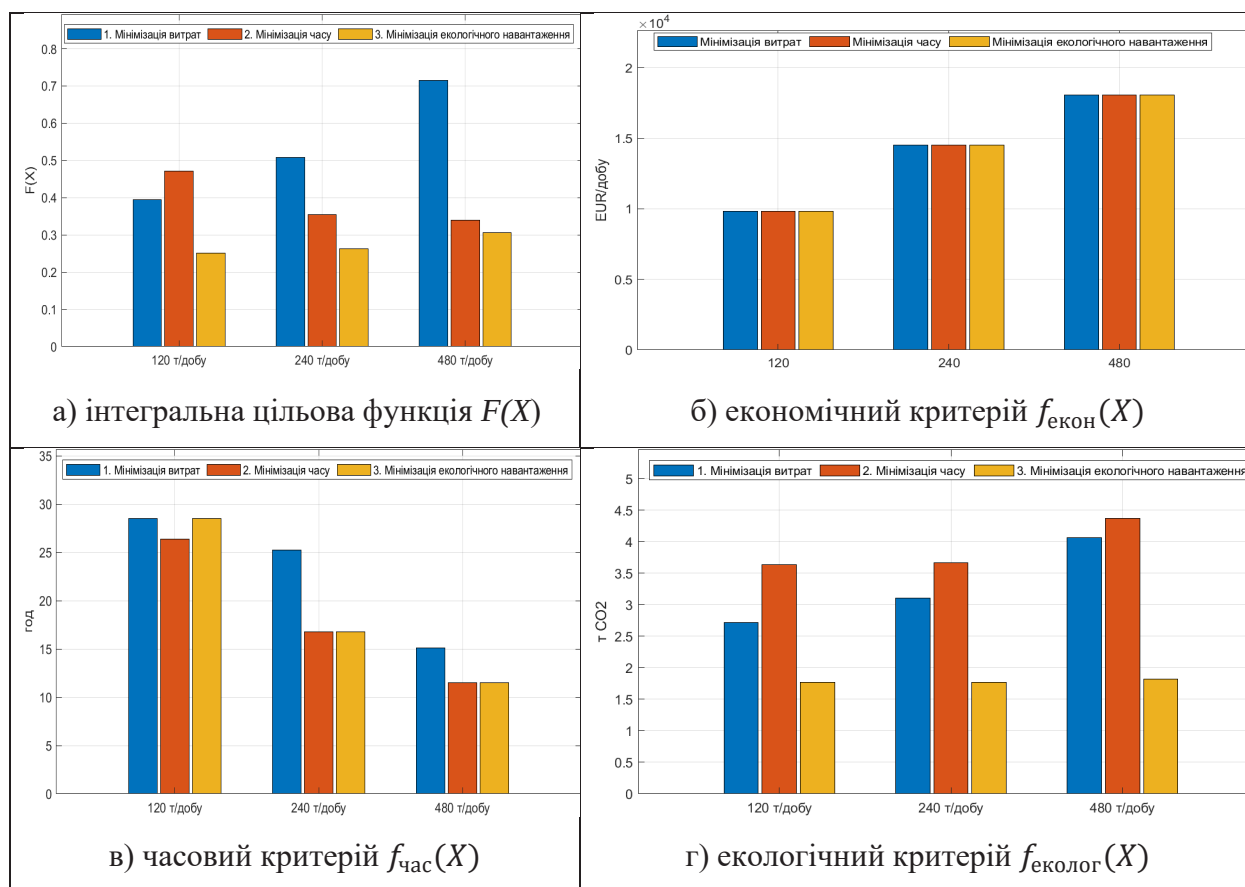


Рис. 1. Значення інтегральної цільової функції $F(X)$ та її складових за різними сценаріями функціонування аеропортового вузла ІТЛС залежно від його потужності

Стратегія мінімізації екологічного навантаження дозволяє майже вдвічі скоротити тривалість технологічного циклу та забезпечити більш стабільний і нижчий рівень викидів CO_2 порівняно з іншими стратегіями. Разом з цим, запровадження екологічно орієнтованих рішень потребує додаткових інвестицій, що зумовлює зростання витрат з 11610 до 33773 євро, однак значення інтегрального критерію ефективності $F(X)$ змінюється відносно повільно – від 0,25 до 0,31, що свідчить про більш збалансований характер розвитку системи.

З метою встановлення ступеня відносного впливу економічної, часової та екологічної складових на формування інтегрального критерію ефективності функціонування аеропортового вузла побудовано діаграму Парето, що відображає сценарії взаємодії різних видів транспорту у процесі обробки вантажів та дозволяє наочно оцінити співвідношення витрат, тривалості обробки вантажів та рівня екологічного навантаження за різними стратегіями розвитку вузла, а також визначити область найбільш ефективних управлінських рішень (рис. 2).

Як показує діаграма Парето (рис. 2), розподіл сценаріїв в межах координат «витрати – час обробки вантажів» відображає різні підходи до забезпечення ефективності функціонування аеропортового вузла ІТЛС залежно від обраної стратегії розвитку. Детальний аналіз діаграми дозволив виділити область найбільш ефективних рішень, яка відповідає інтервалу витрат 18–26 тис. євро при середній тривалості обробки вантажів 15–17 год. До цієї області належать сценарії S1.3 (мінімізація витрат, потужність 480 т/добу), S2.2 та S2.3

(мінімізація часу, потужність 240–480 т/добу), а також S3.2 (мінімізація екологічного навантаження, потужність 240 т/добу), що забезпечують найбільш збалансоване співвідношення витрат, часових параметрів та рівня екологічного впливу.

Отже, проведені розрахунки підтверджують доцільність вибору режимів функціонування аеропортового вузла в межах визначеної області ефективних рішень та демонструють практичну значущість запропонованого багатокритеріального підходу.

Таким чином, на основі узагальнення отриманих даних обчислювального експерименту та сценарного аналізу встановлено закономірності взаємозв'язків між економічними, часовими та екологічними показниками функціонування аеропортового вузла ІТЛС залежно від обраної стратегії розвитку, що обґрунтовує можливість використання запропонованої моделі для оптимізації процесів взаємодії різних видів транспорту під час обробки вантажів на базі аеропортових комплексів.

Висновки. Інтегрована транспортно-логістична система (ІТЛС) являє собою складну соціотехнічну систему, в межах якої аеропорт виступає ключовим вузловим елементом, забезпечуючи організаційно-технологічну узгодженість між різними видами транспорту, синхронізацію та координацію потокових процесів, а також формування високого рівня сталості, гнучкості й адаптивності до впливу зовнішнього та внутрішнього середовища, тоді як ефективність функціонування такого вузла визначається збалансованістю часових, економічних, ресурсних та екологічних параметрів його діяльності.



Рис. 2. Діаграма Парето сценаріїв взаємодії видів транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС в процесі обробки вантажів

Аналіз існуючих наукових підходів показав, що переважна кількість досліджень спрямовані або на оптимізації окремих технологічних операцій, або на стратегічних аспектах розвитку інфраструктурних об'єктів без комплексної формалізації взаємозв'язків між різними видами транспорту в аеропортових вузлах як системоутворювальних елементах ІТЛС, унаслідок чого відсутність цілісного економіко-математичного інструментарію для формалізації та оцінювання взаємовпливів між відповідними параметрами знижує обґрунтованість управлінських рішень щодо організації взаємодії авіаційного та наземного транспорту.

Розроблена багатокритеріальна економіко-математична модель надає можливість оптимізувати процеси взаємодії автомобільного, залізничного та авіаційного транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС з урахуванням економічних витрат, тривалості технологічних циклів та екологічних наслідків, що виникають під час обробки вантажів, поєднуючи методи багатокритеріальної оптимізації, теорії масового обслуговування та сценарного аналізу, а також дозволяє оцінювати інтенсивність надходження вантажопотоків, продуктивність вантажних фронтів, параметри складської підсистеми та враховувати технологічні обмеження конкретного аеропортового вузла.

За результатами сценарного аналізу встановлено, що зміна пріоритетів інтегрального кри-

терію оптимізації суттєво впливає на структуру використання ресурсів системи обробки вантажів, тривалість технологічних операцій, економічні витрати та рівень екологічного навантаження.

Для оцінювання відносного впливу економічної, часової та екологічної складових на формування інтегрального критерію ефективності функціонування аеропортового вузла побудовано діаграму Парето, що дало змогу визначити співвідношення витрат, тривалості обробки вантажів та рівня екологічного навантаження за різними стратегіями розвитку вузла та виокремити область найбільш ефективних рішень, яка відповідає інтервалу витрат 18–26 тис. євро при середній тривалості обробки вантажів 15–17 год.

Апробація запропонованого підходу дозволила встановити закономірності взаємозв'язків між економічними, часовими та екологічними показниками функціонування аеропортового вузла ІТЛС залежно від обраної стратегії розвитку, що обґрунтовує можливість використання розробленої моделі для визначення оптимальних параметрів взаємодії різних видів транспорту під час обробки вантажів та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Подальший розвиток дослідження доцільно спрямувати на створення імітаційної моделі оптимізації взаємодії авіаційного та наземних видів вантажного транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС.

Список літератури:

1. Polater A. Airports' role as logistics centers in humanitarian supply chains: A surge capacity management perspective. *Journal of Air Transport Management*. 2020. Vol. 83. 101765. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101765>.
2. Toet A. Themes for an airport hub in the transition towards a multimodal transport hub – an embedded researcher's perspective. *IASDR 2023: Life-Changing Design*. 2023. URL: <https://doi.org/10.21606/iasdr.2023.272>.
3. Toet A., Boersma K., Kuijk J. V. Reimagining the role of hub airports as multimodal transport hubs in a sustainable future. *Journal of Airport Management*. 2025. Vol. 19, no. 3. P. 206. URL: <https://doi.org/10.69554/owdx1327>.
4. Lee H., Yang H. M. Strategies for a global logistics and economic hub: Incheon International Airport. *Journal of Air Transport Management*. 2003. Vol. 9, no. 2. P. 113–121. URL: [https://doi.org/10.1016/s0969-6997\(02\)00065-0](https://doi.org/10.1016/s0969-6997(02)00065-0).
5. Węglinski B. Central transport hub in Poland's airport system. *Journal of Modern Science*. 2025. Vol. 62, no. 2. P. 739–759. URL: <https://doi.org/10.13166/jms/207574>.
6. Akimova T. A., Nadutenko T. V., Moiseeva N. O. Strategies for future development of hub airport in Ukraine. *Science-based Technologies*. 2013. Vol. 20, no. 4. URL: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.20.5692>.
7. Van Asch T. et al. Air cargo and airport competitiveness. *Journal of Air Transport Studies*. 2019. Vol. 10, no. 2. P. 48–75. URL: <https://doi.org/10.38008/jats.v10i2.142>.
8. Zheng Y., Huang Y., Wang H. Integrated hub airport location and fleets planning for airline-alliance-oriented freight transport system. *Journal of Air Transport Management*. 2026. Vol. 130. 102889. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102889>.
9. Hatipoğlu S., Ergül H., Yazıcı E. Selection of secondary hub airport location based on connectivity and green airport solutions. *Networks and Spatial Economics*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s11067-024-09622-6>.
10. Watanabe D. et al. Hub airport location in air cargo system. *SICE 2008 – 47th Annual Conference*. 2008. URL: <https://doi.org/10.1109/sice.2008.4654791>.
11. Zhou C. C., Hu D. D. Location optimization of airport emergency firefighting system. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 779–780. P. 985–990. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.779-780.985>.

12. McNair A. W., Kwon K. Cargo airport planning: Discerning spatial distributions of freight development in airport-adjacent communities. *Transportation Research Record*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1177/03611981231178808>
13. Du H., Tu M., Wang Z. Coordination assessment and optimization of airport hubs and integrated transportation networks. *ICTETS 2024*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1117/12.3054938>.
14. Qiu J., Zhang K., Tang M. Dynamic optimization strategy of large airport cargo location based on virus evolutionary genetic algorithm. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*. 2022. Vol. 70, no. 1. P. 73–83. URL: <https://doi.org/10.46904/eea.22.70.1.1108008>
15. Piera Eroles M. À., Ramos J. J., Robayna Fernandez E. Airport logistics operations. In: *Simulation-Based Case Studies in Logistics*. London, 2009. P. 209–228. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-84882-187-3_12.
16. Kang X., Chen L. Quantifying the environmental benefits of green development: A carbon emission reduction analysis of air logistics in airport-type national logistics hub cities. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1002/ep.14572>.
17. Fu Y. et al. Carbon emission prediction of hub airport under dual carbon background: Take a hub airport in southwest China as an example. *Advances in Computer and Engineering Technology Research*. 2024. Vol. 1, no. 4. P. 158. URL: <https://doi.org/10.61935/acetr.4.1.2024.p158>.
18. Sun, S., & Kamath, M. (2025). Applications of queueing models to improve airport operations. *Queueing Models and Service Management*, 8(1), 51–82. URL: <http://qmsm.nchu.edu.tw/index.php/qmsm/article/view/100/95>.
19. Jain, R., Bedekar, H., Jayakrishna, K., Vimal, K. E. K., & Vijaya Kumar, M. (2020). Analysis and optimization of queueing systems in airports—Discrete event simulation. In H. Voruganti, K. Kumar, P. Krishna, & X. Jin (Eds.), *Advances in applied mechanical engineering* (Lecture Notes in Mechanical Engineering). Springer. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1201-8_125.
20. Saaty T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*. 1977. Vol. 15, no. 3. P. 234–281. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
21. Saaty T. L. Priority Setting in Complex Problems. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Berlin, Heidelberg, 1983. P. 326–336. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-46473-7_32.

Sokolova O.Ye., Borets I.V. MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF CARGO HANDLING PROCESSES IN AN AIRPORT NODE OF AN INTEGRATED TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM

Modern transport and logistics processes are characterized by increasing requirements for speed, reliability, and economic efficiency of freight transportation, while ensuring cargo integrity and minimizing environmental impact. Under these conditions, integrated transport and logistics systems (ITLS) become increasingly important, where airports act as system-forming nodes that ensure coordination, synchronization, and integration of different modes of transport.

The efficiency of airport node operation is determined by the balance of economic, time, and environmental parameters, which necessitates the application of comprehensive approaches to optimizing cargo handling processes. It is established that existing scientific approaches are mainly focused on individual aspects of air transport systems and do not provide a comprehensive formalization of interactions between different modes of transport within airport nodes.

This study develops a multicriteria economic and mathematical model for optimizing the interaction processes of road, rail, and air transport within an airport node of an ITLS, taking into account economic costs, processing time, and environmental impacts. The model is based on a combination of multicriteria optimization methods, queueing theory, and scenario analysis, enabling the assessment of freight flow intensity, handling capacity of cargo terminals, and parameters of the warehouse subsystem under technological constraints of a specific airport node.

The results of the computational experiment show that changes in the priorities of the integrated optimization criterion significantly affect resource allocation, processing time, economic costs, and environmental performance of the cargo handling system. Based on Pareto analysis, a region of the most efficient solutions is identified, corresponding to cost values of EUR 18–26 thousand and an average cargo handling time of 15–17 hours.

The obtained results confirm the applicability of the proposed model for determining optimal parameters of multimodal interaction in airport cargo handling processes and for supporting informed decision-making. Further research is aimed at developing a simulation model for optimizing the interaction between air and ground freight transport within an airport node of an integrated transport and logistics system.

Keywords: integrated transport and logistics system, airport node, multimodal transport interaction, cargo handling, multicriteria optimization, economic and mathematical model, scenario analysis.

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 551.513.3:551.465(262.54):656.61
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/42>

Томчаковський Г.Г.

<https://orcid.org/0000-0002-9799-4368>
Одеський національний морський університет

Кучеренко Н.В.

<https://orcid.org/0009-0009-9461-1411>
Національний університет «Одеська морська академія»

Капочкіна М.Б.

<https://orcid.org/0000-0002-9770-3284>
Одеський національний морський університет

МІНЛИВІСТЬ ЛІТНЬОГО МУСОНУ В АРАВІЙСЬКОМУ МОРІ

У роботі проаналізовано особливості внутрішньосезонної мінливості поверхневого хвилювання в Аравійському морі під час літнього мусону з позицій забезпечення безпеки мореплавства та ефективності морського транспорту. На основі даних супутникових альтиметричних спостережень за 2010–2019 роки досліджено статистичні та спектральні характеристики швидкості вітру і висоти хвиль, зокрема внесок циклічних складових. Особливу увагу приділено аналізу коротко- та середньоперіодних коливань, що формують внутрішньосезонну структуру хвильового поля та визначають змінність морських умов в межах одного мусонного періоду. Показано, що максимум штормової активності може зміщуватися з серпня на червень, що істотно ускладнює планування навігації в Аравійському морі. Таке зміщення пікових значень хвильової активності має важливі наслідки для організації морських перевезень, оскільки традиційні уявлення про сезонну динаміку можуть не відповідати фактичним умовам конкретного року. Встановлено, що на різних етапах розвитку літнього мусону процес формування хвильового режиму під впливом геофізичних факторів може розподілятися на першу стадію (до дати сонцестояння), коли причина випереджає наслідок, і другу фазу, після зазначеної дати, коли хвильові умови формуються в режимі самопідтримання. Така двофазна структура розвитку хвильового процесу дозволяє більш точно інтерпретувати механізми взаємодії атмосферних і океанічних факторів та уточнює уявлення про динаміку мусонної циркуляції. Додатково показано, що варіабельність хвильових характеристик має складний спектральний склад, що обумовлює необхідність використання комплексних підходів до аналізу та прогнозування. Отримані результати підкреслюють актуальність дослідження внутрішньосезонної мінливості літнього мусону в Аравійському морі і врахування несприятливих погодних умов для оптимізації морської логістики та зменшення ризиків для судноплавства. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих залежностей для підвищення точності прогнозування хвильових умов, планування маршрутів суден та мінімізації впливу небезпечних гідрометеорологічних явищ на функціонування морського транспорту.

Ключові слова: літній мусон, Аравійське море, внутрішньосезонна мінливість, поверхнєве хвилювання, штормова активність, супутникова альтиметрія, морська логістика, морська навігація, безпека судноплавства, геофізичні фактори.

Постановка проблеми. Аравійське море є одним із ключових вузлів світового морського транспорту, у межах якого зосереджені інтенсивні судноплавні маршрути між Європою, Близьким Сходом та Південною Азією. Водночас саме в цьому регіоні щорічно формується літній Індокіанський мусон, що характеризується сильними вітрами та небезпечним хвилюванням,

які істотно ускладнюють умови безпеки мореплавства.

Як показано в роботах Webster P. J., Gadgil S., Krishnamurti T. N., Bhalme H. N., Meehl G. A. [1–4], класичне пояснення мусонної циркуляції базується на термічному контрасті між сушею та океаном. У межах цього підходу літній мусон розглядається як результат формування термічного мінімуму

тиску над Індостаном. Динамічний підхід Gill A. E. [5] доповнює це уявлення роллю загальної циркуляції атмосфери та планетарних хвиль. Проте аналіз фактичних спостережень свідчить, що зазначені фізичні моделі не здатні кількісно пояснити реальну інтенсивність мусонних вітрів і хвильових процесів в Аравійському морі.

У наших попередніх дослідженнях пропонується розглядати літній мусон в Аравійському морі як елемент системи океан–атмосфера, чутливий до змін швидкості обертання Землі та гравітаційного поля. Такий підхід, обґрунтований у працях Максимова І. В., Сидоренкова Н. С., Сумерова К. А., Peixoto J. P., Oort A. H. [7–9], дозволяє пояснити як регулярність сезонного розвитку мусону, так і його внутрішньосезонну та міжрічну мінливість, що має безпосереднє прикладне значення для морського транспорту.

Незважаючи на значну кількість досліджень мусонної циркуляції, проблема кількісного пояснення внутрішньосезонної мінливості літнього мусону в Аравійському морі залишається невирішеною. Зокрема, за сталого напрямку вітру в регіоні епізодично фіксуються різкі коливання його швидкості, які безпосередньо впливають на хвилювання моря та, відповідно, на навігаційні умови.

Як зазначено у «Indian monsoons under close scrutiny of scientists» [6], сучасні чисельні прогностичні моделі відтворюють лише загальні сезонні риси мусону та демонструють значні похибки при описі його внутрішньосезонної мінливості. Це істотно знижує їх практичну цінність для забезпечення безпеки мореплавства в Аравійському морі.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває дослідження внутрішньосезонної мінливості хвильового режиму з урахуванням додаткових геофізичних чинників, що дозволить підвищити точність прогнозування морських умов і зменшити ризики для судноплавства.

Це зумовлює необхідність пошуку нових підходів до пояснення механізмів внутрішньосезонної мінливості мусону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових джерел свідчить, що дослідження мусонної циркуляції умовно можна згрупувати у три основні напрями, кожен з яких пояснює окремі риси літнього мусону, але не забезпечує цілісного опису його внутрішньосезонної мінливості.

Перший напрям представлений роботами, у яких мусон розглядається як переважно термічно зумовлене явище, що формується внаслідок диференційного нагрівання суші та океану [1 – 4]. У межах

цього підходу літній мусон інтерпретується як відповідь атмосфери на формування термічного мінімуму тиску над Індостаном. Разом із тим результати спостережень показують часову неузгодженість між максимумом прогріву суші, який фіксується наприкінці квітня, та фактичним початком стійкої мусонної циркуляції в червні, а також між піками температури, опадів і швидкості вітру [6, 10]. Це свідчить про обмеженість виключно термічного пояснення мусонних процесів.

Другий напрям охоплює динамічні моделі мусонної циркуляції, що базуються на аналізі загальної циркуляції атмосфери [5, 11]. Однак у тропічних широтах, зокрема над Аравійським морем, горизонтальна складова сили Кореолісу є малою, що істотно обмежує застосування геострофічного балансу. Як показано в роботах «Indian monsoons under close scrutiny of scientists» та «The El Niño–Southern Oscillation Phenomenon» [6, 12], величини баричних градієнтів, які спостерігаються в літній період, не забезпечують кількісно узгодженого пояснення реальної інтенсивності мусонних вітрів, хвилювання Аравійського моря та пов'язаних із ними навігаційних ризиків.

Третій напрям досліджень пов'язаний із вивченням впливу геодинамічних процесів на атмосферу та океан [7 – 9, 13]. У цих роботах показано, що навіть незначні варіації швидкості обертання Землі та гравітаційного потенціалу можуть призводити до перебудови баричного поля і генеральних напрямків потоків повітря у системі океан–атмосфера. Особливу роль у цьому контексті відіграє від'ємна аномалія геоїда Індійського океану, просторові та часові характеристики якої детально розглянуті в роботах Hager B. H., Clayton R. W., Richards M. A., Schott F. A., McCreary J. P., Кучеренко Н. В., Томчаковський Г. Г., Капочкіна М. Б., Калініченко Є. В. [14 – 17]. Наявність цієї аномалії створює стаціонарні умови для формування специфічної циркуляційної структури, пов'язаної з розвитком літнього мусону.

Окрему групу становлять дослідження океанічних процесів в Аравійському морі, зокрема сезонної перебудови Сомалійської течії та формування масштабного апвелінгу [6, 15]. Аналіз часової еволюції цих процесів показує, що інтенсифікація апвелінгу нерідко передують максимальному посиленню мусонних вітрів. Це суперечить класичному уявленню про виключно атмосферне походження мусонної циркуляції та свідчить про активну роль океану у формуванні приводного вітру, термічних контрастів і, відповідно, навігаційних умов у регіоні.

Таким чином, аналіз використаних джерел показує, що наявні термічні та динамічні теорії не забезпечують цілісного пояснення внутрішньосезонної мінливості літнього мусону в Аравійському морі. Сукупність результатів, наведених у працях Кучеренко Н. В., Томчаковського Г. Г., Капочкіної М. Б., Калініченко Є. В., Максимова І. В., Сидоренкова Н. С., Сумерова К. А., Peixoto J. P., Oort A. H., Blewitt G., Lavallée D., Clarke P., Nurutdinov K. [6 – 9, 16 – 17], вказує на необхідність урахування геофізичних чинників у дослідженнях мусонної циркуляції. Це є особливо важливим для задач прогнозування небезпечних гідрометеорологічних умов і підвищення безпеки мореплавства в одному з найскладніших регіонів світового судноплавства.

У роботі авторів Кучеренко Н. В., Томчаковського Г. Г., Капочкіної М. Б., Калініченко Є. В. [16] вперше на кількісному рівні розглянуто механізм формування літньої мусонної циркуляції атмосфери над великомасштабною від'ємною аномалією сили тяжіння Індійського океану. Показано, що мусонний вітер формується над цією аномалією у перманентному режимі, а не тільки під час формування максимуму термічного градієнту між сушею та океаном, що підтверджує обмеженість класичних термічних моделей. Автори обґрунтовують, що саме регіональна аномалія гравітаційного поля визначає стаціонарність циркуляції в Аравійському морі, а мусонний вітер є реакцією атмосфери на порушення рівноваги між гравітаційними та інерційними силами в системі океан–атмосфера.

Подальший розвиток цього підходу наведено в роботі [17], де показано, що мінливість інтенсивності мусонного вітру не може бути пояснена виключно мінливістю баричного поля. На основі аналізу часових змін швидкості обертання Землі встановлено, що навіть малі флуктуації кутової швидкості обертання Землі (КШОЗ) призводять до зміни інерційного стану водної оболонки Індійського океану, що, у свою чергу, викликає перебудову приводного вітру. Отримані результати дозволяють пояснити внутрішньосезонні коливання швидкості мусонного вітру за відсутності істотних змін термічних або баричних полів, що має принципове значення для прогнозування небезпечних умов мореплавства.

У роботі Blewitt G., Lavallée D., Clarke P., Nurutdinov K. [18] зроблено важливе наукове відкриття річної моди геодинамічних процесів глобального масштабу з екстремумами у березні і вересні. Таким чином, результати багатьох дослі-

джень свідчать про те, що мусонні процеси слід розглядати як прояв планетарної взаємодії обертання Землі, гравітаційного поля та океанічної циркуляції, що істотно розширює уявлення про причини мінливості мусонного вітру та їх вплив на безпеку мореплавства.

Таким чином, існуючі підходи не забезпечують пояснення внутрішньосезонної мінливості хвильового режиму в Аравійському морі з урахуванням геофізичних чинників, що обумовлює необхідність проведення додаткових досліджень у цьому напрямку.

Постановка завдання. *Метою статті є дослідження внутрішньосезонної мінливості хвильового режиму в Аравійському морі під час літнього мусону з урахуванням впливу геодинамічних факторів.*

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- проаналізувати часові ряди швидкості вітру та висоти хвиль;
- дослідити спектральні характеристики мінливості;
- оцінити зв'язок хвильових процесів із варіаціями КШОЗ.

Для розв'язання завдань факторного аналізу використано дані проєктів AVISO+ [19] (просторово-часові зміни поверхні океану, поверхневого хвилювання та приводного вітру в Аравійському морі), а також матеріали сайту «International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)» <https://hpiers.obspm.fr> [20] (результати вимірювань кутової швидкості обертання Землі). Були враховані результати досліджень Кучеренко Н. В., Томчаковського Г. Г., Капочкіної М. Б., Калініченко Є. В., Колесника А. В., Долі В. Д. [16, 17, 21, 22], що підтверджують вплив на мусонну циркуляцію атмосфери над Аравійським морем геодинамічних процесів. Це узгоджується з висновками дослідження Бороздич Э. В. фундаментального рівня [23] відзначеного у дипломі № 273 за наукове відкриття.

У наших попередніх дослідженнях був проведений аналіз міжрічної мінливості літнього Індокіанського мусону у період 2002 – 2017 років і було встановлено, що вона не може бути адекватно пояснена також глобальними кліматичними індексами ENSO та регіональними IOD.

Виклад основного матеріалу. За даними ГІС AVISO+ [19] отримано первинні дані мінливості швидкості вітру та висоти хвиль у Аравійському морі в період літнього мусону (червень – серпень) у 2014 – 2019 роках.

Враховуючи результати дослідження глобальних геодинамічних процесів, зокрема зональних припливів у твердому тілі Землі, що пов'язані з двотижневою циклічністю КШОЗ і формують двотижневий цикл зміни параметру J_2 , який кількісно визначає «сплюсненість» Землі [24, 25], для часового періоду 2010-2019 рр. були розраховані спектральні характеристики гармонік 14 та 28 діб часових рядів висот максимальних поверхневих хвиль у Аравійському морі та кутової швидкості обертання Землі. У таблиці 1 наведені значення амплітудних спектрів часового ряду висот максимальних поверхневих хвиль [19].

Виконані розрахунки свідчать про те, що часова мінливість поверхневого хвилювання з періодами 14 та 28 діб мала максимальні амплітуди у 2015 році. Нашими попередніми дослідженнями було виявлено, що літній мусон 2015 року співпав з процесами глобального масштабу під «умовною назвою» Ель-Ніньо. Важливо відмітити, що у третьому томі монографії у [26] було показано, що зміни у тропічній зоні у роки Ель-Ніньо гене-

руються ротаційними процесами. У зазначений період, мусон було визначено як пригнічений, але з потужною внутрішньо мусонною мінливістю. Тобто, оцінка середньої висоти вітрових хвиль була мінімальною (3,5 м), але дисперсія максимальною (0,79). Аналіз результатів апроксимації часового ряду поліноміальним рівнянням параболічного типу показав на екстремальний характер швидкості зміни прискорення процесу хвилювання протягом сезону ($A=9,2$) і третій за значенням показник асиметрії ($B=0,33$). Максимальними були і відхилення від моделі ($СКВ_{\text{моделі}}=5,6$). Це дало підставу для дослідження статистичних характеристик мусону окремо у червні та у липні – серпні. Результати статистичної обробки даних максимальної по регіону швидкості вітру у 2014 – 2019 роках показані у таблиці 2, а максимальної висоти хвиль – у таблиці 3.

Таким чином було встановлено, що максимум інтенсивності мусону, який очікувався у липні-серпні у роки, так званого, Ель Ніньо 2015 – 2016 років, відбувся у червні. У червні

Таблиця 1

Значення амплітуд спектрів часових рядів висот максимальних поверхневих хвиль у Аравійському морі (червень-серпень)

Рік	28 діб	14 діб	Рік	28 діб	14 діб
2010	0,055	0,085	2015	0,3	0,524
2011	0,044	0,089	2016	0,007	0,113
2012	0,028	0,085	2017	0,07	0,151
2013	0,033	0,208	2018	0,150	0,116
2014	0,182	0,233	2019	0,143	0,054

Джерело: власна розробка авторів на основі [19]

Таблиця 2

Статистичні характеристики для максимального вітру (км/годину) у Аравійському морі для червня та для липня-серпня

Рік	Червень (середнє)	Липень-серпень (середнє)	Червень СКВ	Липень-серпень СКВ	Червень максимум	Дати максимумів
2014	39,83	42,75	68,00	44,66	51	
2015	42,73	40,33	77,10	20,61	59	(20-23 червня)
2016	42,60	40,41	25,40	23,08	52	(23-24 червня)
2017	39,17	37,17	18,53	19,14	46	
2018	39,86	42,93	12,64	15,83	45	
2019	39,80	42,64	19,02	13,68	46	

Джерело: власна розробка авторів на основі [19]

Таблиця 3

Статистичні характеристики для максимальних висоти хвиль (м) у Аравійському морі для червня та для липня-серпня

Рік	Червень (середнє)	Липень-серпень (середнє)	Червень СКВ	Липень-серпень СКВ	Червень максимум	Дати максимумів
2014	3,6	3,75	0,95	0,80	5,5	
2015	3,8	3,3	1,20	0,60	6,2	(21-23 червня)
2016	3,8	3,7	0,79	0,65	5,3	(23-24 червня)
2017	3,6	3,4	0,60	0,57	4,8	
2018	3,6	4,1	0,57	0,66	4,7	
2019	3,5	3,9	0,73	0,56	4,6	

Джерело: власна розробка авторів на основі [19]

2015 року середня оцінка максимального вітру була 42,73 км/годину (липень – серпень – 40,33 км/годину), а середня за червень оцінка максимальної висоти хвиль була 3,8 м (липень – серпень – 3,3 м). Нами були визначені дати екстремальних значень швидкості вітру (табл. 2) і висоти хвиль (табл. 3). Звертаємо увагу і на те, що швидкості вітру та висоти хвиль у червні мають максимальне СКВ 77,1 і 1,2 відповідно. Це свідчить про наявність у червні 2015 та 2016 років рівнів як з потужним штормом, так і зі штилем. Виявлено, що позитивні екстремуми швидкості вітру та висоти хвиль, тобто найпотужніші шторми літнього мусону, зафіксовано у дати літнього сонцестояння, тобто у дати, коли добові та довгоперіодні припливоутворюючі сили є екстремальними і досягають $2,64 \cdot 10^5$ дин і $2,09 \cdot 10^5$ дин, відповідно [25]. На рисунку 1 показані карти за 22 червня 2015 року: швидкості вітру (максимум 59 км/годину) та висоти хвиль (максимум 6,6 м).

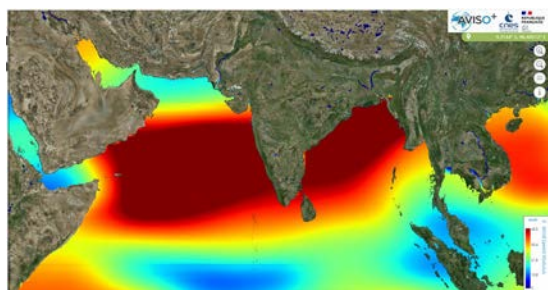
З метою визначення впливу річних екстремумів добових та довгоперіодних припливоутворюючих сил (22 червня) на активність літнього мусону, було обрано «фрагментарний» і екстремально потужний мусон 2010 року, що відбувся під впливом активізації геофізичних процесів. У 2010 році весняний сезон був найтеплішим за всю історію

інструментальних вимірювань, а у літній сезон глобальна кількість опадів досягла максимальних значень з 1900 року [28]. Середньорічна температура повітря в Індії була найвищою за всю історію національних спостережень з 1901 року [28]. Мусонні дощі у Пакистані (мусон Аравійського моря) наприкінці липня спричинили наймасштабнішу за всю історію спостережень повінь, а у Бангладеш (мусон Бенгальської затоки) сезон мусонних дощів виявився найсухішим з 1994 року [29, 30]. Відмінності мусонів у Аравійському морі та Бенгальській затоці розглянуті нами у роботі Колесника А. В., Долі В. Д., Кучеренко Н. В. [21].

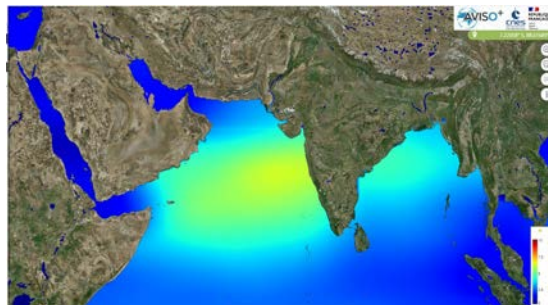
Додатковою особливістю 2010 року була нетипова різка внутрішньорічна перебудова системи ENSO: рік розпочався у фазі Ель-Ніньо, проте вже у літній період відбувся швидкий перехід до фази Ла-Ніньї [31].

До аналізу були залучені дані 2010 року: часовий ряд добових значень максимальної висоти хвиль в Аравійському морі, як інтегральна характеристика погодних умов (рис. 2), і КШОЗ [20] – як один з ймовірних погодоутворюючих факторів.

На графіку проявлено асиметрію літнього мусону 2010 року: максимальна висота вітрових хвиль була згенерована штормовими умовами ще на початку червня. Максимальний рівень хвилю-



а



б

Рис. 1. Карты північної частини Індійського океану станом на 22 червня 2015 р.: а) швидкості вітру; б) висоти хвиль

Джерело: [19]

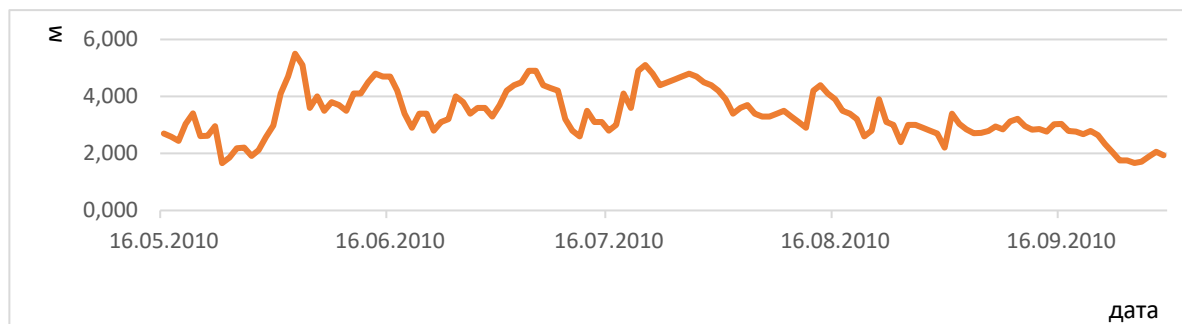


Рис. 2. Графік змін у часі максимальної висоти хвиль в Аравійському морі.

Джерело: власна розробка авторів

вання у Аравійському морі завершився у липні. За сезон літнього мусону зафіксовані 4 епізоди припинення шторму тривалістю до двох тижнів.

Шляхом вузько-смугової фільтрації, гармоніки з періодами 28 і 14 діб були вилучені з часового ряду максимальної висоти хвиль в Аравійському морі і представлені на рисунку 3.

За результатами стандартизації гармонік з періодами 28 і 14 діб часового ряду висот поверхневих хвиль була розрахована інтегральна характеристика циклічних змін висот поверхневих хвиль (рис. 4).

Графік часових змін інтегральної характеристики циклічних змін (28 та 14 діб) висот поверхневих хвиль – це, за суттю, відновлений часовий ряд хвилювання (рис. 2) за даними суми стандартизованих гармонік. Відновлений ряд було верифіковано з фактичним часовим рядом хвилювання, шляхом розрахунку коефіцієнтів кореляції (табл. 4).

Таблиця 4

Результати верифікації відновленого (модельного) та фактичного часових рядів хвилювання

Рік	28 діб r	14 діб r	Σ r
2010	0.41	0.32	0.57

Джерело: власна розробка авторів

В результаті було визначено, що часовий ряд мінливості поверхневого хвилювання Аравійського моря у 2010 році у значній мірі формується під впливом процесів, що відбуваються циклічно, бо між часовим рядом мінливості поверхневого хвилювання і часовим рядом амплітуди інтегральної характеристики циклічних змін 28 та 14 діб виявлено наявність значного позитивного лінійного зв'язку (коефіцієнт кореляції $r=0,57$).

Проаналізуємо особливості часової мінливості КШОЗ під час літнього мусону 2010 року.

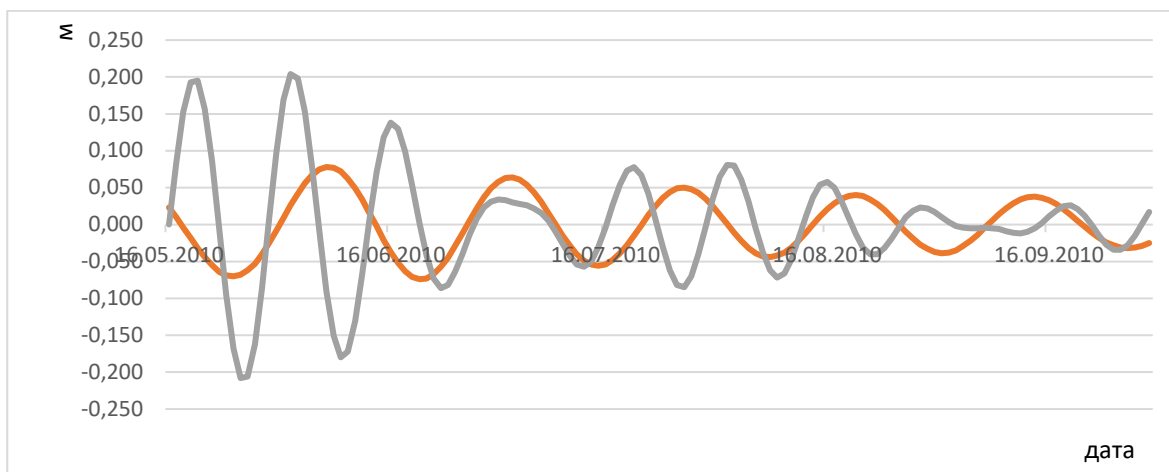


Рис. 3. Графіки гармонік з періодом 28 (червоний) і 14 діб (зелений), вилучених з часового ряду максимальних висот поверхневих хвиль

Джерело: власна розробка авторів

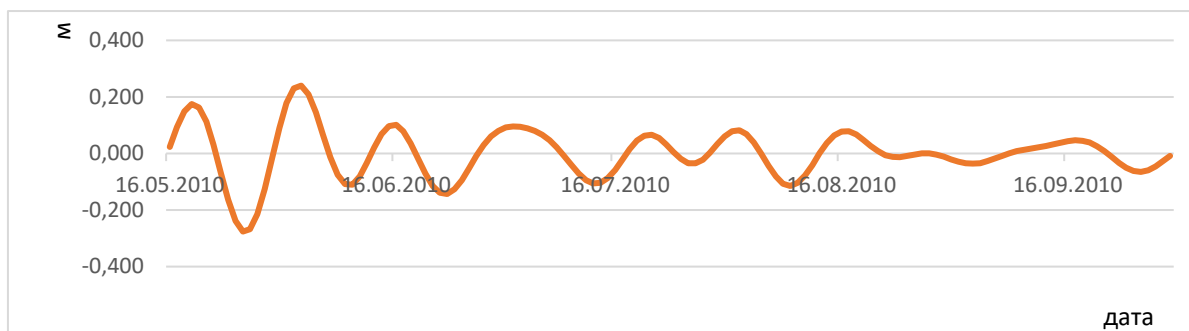


Рис. 4. Графік змін у часі амплітуди інтегральної характеристики циклічних змін 28 та 14 діб (відновлений графік циклічних висот поверхневих хвиль)

Джерело: власна розробка авторів

Результати аналізу даних, приведених на рисунках 2 і 5, свідчать про те, що усі 4 епізоди посилення мусону (10 червня, 5 липня, 21 липня і 13 серпня) відбулися в умовах позитивного екстремуму КШОЗ. Як вже було констатовано, цикли з періодом 28 і 14 діб є характерними для КШОЗ. Шляхом вузько-смугової фільтрації, зазначені гармоніки були вилучені з часового ряду КШОЗ і показані на рисунку 6.

За результатами стандартизації гармонік КШОЗ з періодами 28 і 14 діб була розрахована інтегральна характеристика циклічних змін КШОЗ (рис. 7).

Умовно кажучи, графік на рисунку 7 побудований аналогічно графіку на рисунку 4. Враховуючи це очікувалося, що позитивні аномалії КШОЗ, як причина активізації мусону, повинні мати позитивний зсув у часі.

Враховано, що на дату 22 червня припадає зміна знаку довгоперіодних припливоутворюючих сил. З цієї причини дані за червень-серпень 2010 року, було поділено на дві окремі вибірки. Були сформовані вибірки перелічених часових рядів до і після 23 червня 2010 р., і розраховані функції когерентності та фазового зсуву між часовими рядами, наведеними на рисунках 4 та 7. Для двох зазначених вибірок було проведено взаємний спектральний аналіз, результати якого наведено у таблиці 5.

Відповідно до виконаних розрахунків для часових рядів, наведених на рисунках 4, 7, визначено, що до 23 червня позитивна аномалія КШОЗ випереджає посилення штормових умов, а після 23 червня штормові умови посилюються на фазу зниження значень КШОЗ. Важливо констатувати, що когерентність оцінена в інтервалі 0,88-0,87,

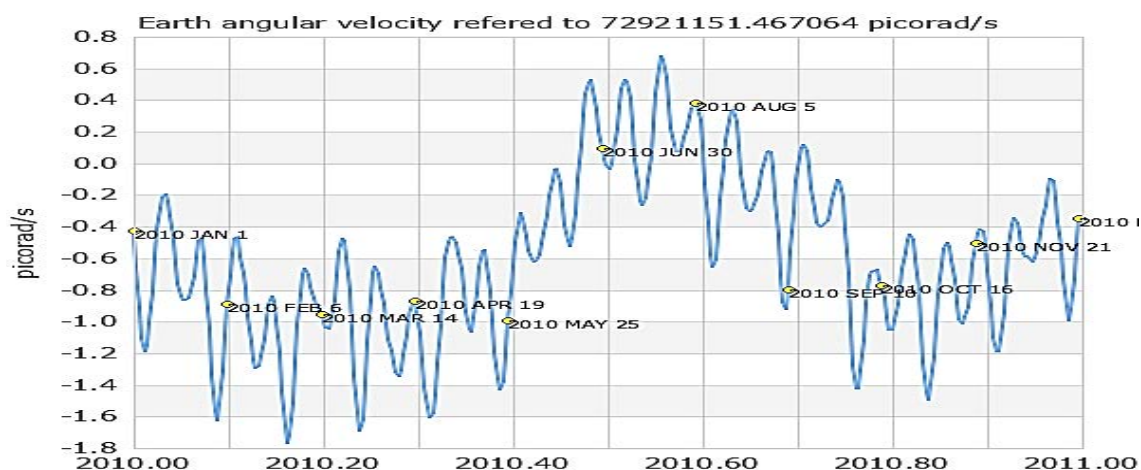


Рис. 5. Зміни у часі КШОЗ у 2010 р.

Джерело: [20]

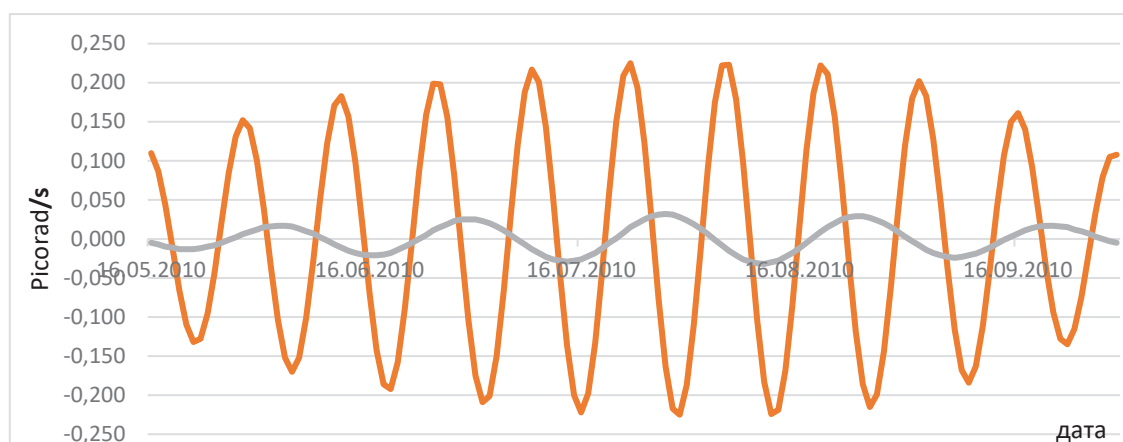


Рис. 6. Графіки змін у часі амплітуд гармонік з періодом 28 (зелений) і 14 діб, вилучених з часового ряду КШОЗ

Джерело: власна розробка авторів

тобто однакова для обох вибірок. З метою перевірки отриманих результатів було задіяно кореляційний аналіз (табл. 6).

В результаті перевірки було підтверджено, що до 23 червня штормові умови формуються через 3-4 доби після максимуму КШОЗ, а після 22 червня хвилі формуються за 3 доби перед максимумом КШОЗ. До 23 червня:

- мусонна система ще формується;
- вітер і хвилювання є залежними відносно зовнішніх впливів;
- КШОЗ може виступати як *ініціюючий сигнал* і тому причина випереджає наслідок.

Після 23 червня:

- мусонна циркуляція вже сформована;

- атмосферні процеси стають самопідтримуваними;

- хвилювання океану реагує на вітрові структири, а не на зовнішній повільний фактор.

Тобто, після 22 червня домінує керування з боку вже збудженої мусонної циркуляції.

Після 22 червня спостерігається зміна знаку фазового зсуву між оціночними параметрами, що свідчить про перехід мусону в інший динамічний режим. У цьому режимі взаємодія змінних визначається спільним фоновим керуванням і внутрішніми зворотними зв'язками, внаслідок чого часові зсуви втрачають прямий причинний зміст.

Висновки. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що традиційне уявлення про

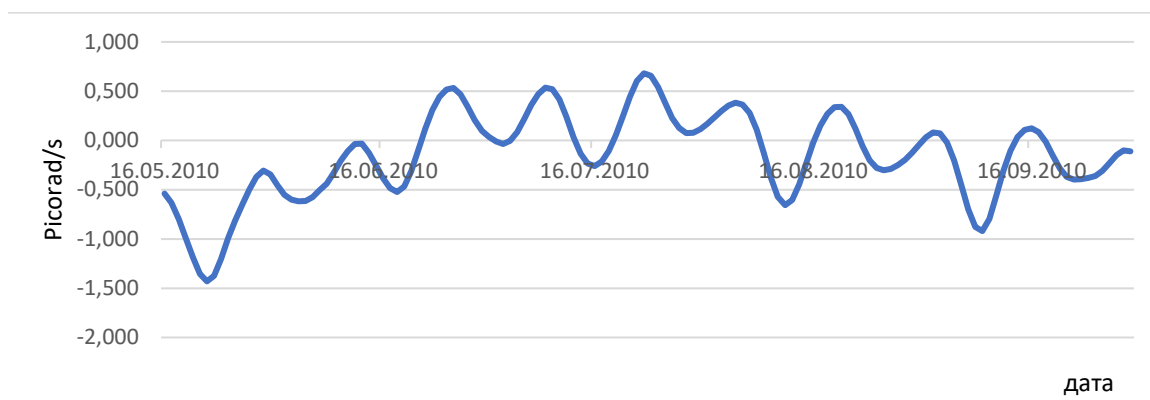


Рис. 7. Графік змін у часі амплітуди інтегральної характеристики циклічних змін 28 та 14 діб (відновлений графік циклічних змін КШОЗ)

Джерело: власна розробка авторів

Таблиця 5

Результати взаємного спектрального аналізу відтворених часових рядів циклічної складової мінливості КШОЗ, як причини, і висот поверхневих хвиль, як наслідок, за термін дії літнього мусону 2010 р. (з розділенням на дві фази до і після дати 23 червня)

Характеристика	До 23.06 28 діб	До 23.06 14 діб	Після 23.06 28 діб	Після 23.06 14 діб	До 23.06 сумарно	Після 23.06 сумарно
Когерентність	0,41	0,73	0,39	0,55	0,88	0,87
Фазовий зсув	-89 °	-73 °	43 °	81 °	100°	-95°

Джерело: власна розробка авторів

Таблиця 6

Результати змін значень коефіцієнту кореляції між часовими рядами відтворених характеристик КШОЗ та висот поверхневих хвиль до і після 23 червня, зсунутих один відносно другого на 0-5 діб

Тривалість часу зсуву даних	Значення коефіцієнта кореляції (КШОЗ -хвилі) до 23 червня	Значення коефіцієнта кореляції (хвилі - КШОЗ) після 23 червня
Без зсуву	-0,17	0,05
Зсув 1 день	0,25	0,36
2 дні	0,65	0,59
3 дні	0,89	0,71
4 дні	0,89	0,67
5 днів	0,71	0,49

Джерело: власна розробка авторів

липнево-серпневий максимум небезпечних хвильових умов у Аравійському морі під час літнього мусону є потребує уточнення. Для підвищення безпеки мореплавства доцільно враховувати можливість ранніх (червневих) штормових максимумів і підвищеної мінливості хвилювання, особливо в роки з аномальним проявом мусонної циркуляції.

Встановлено, що поверхневе хвилювання в Аравійському морі під час літнього мусону характеризується не лише сезонною, а й вираженою внутрішньосезонною мінливістю яка має суттєве значення для прогнозування навігаційних ризиків у період червень–серпень і яка проявлена чергуванням штормових і квазіштильових умов, що ускладнює оперативне планування мор-

ських перевезень. Наявність циклічних складових означає, що небезпечні для мореплавства умови можуть формуватися незалежно від середньосезонної сили мусону.

Практичне значення проведеного аналізу полягає в можливості використання виявлених закономірностей для уточнення внутрішньосезонних прогнозів хвильових умов, оптимізації маршрутів суден, планування графіків рейсів і, як результат, зниження аварійних ризиків у Аравійському морі.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні часових рядів спостережень, вдосконаленні методів прогнозування внутрішньосезонної мінливості та інтеграції отриманих результатів у прикладні системи підтримки прийняття рішень у судноплавстві.

Список літератури:

1. Webster P. J. The elementary monsoon. *Monsoons* / ed. by J. Fein, P. Stephens. New York: Wiley, 1987. P. 3–32.
2. Gadgil S. The Indian monsoon and its variability. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2003. Vol. 31. P. 429–467.
3. Krishnamurti T. N., Bhalme H. N. Oscillations of a monsoon system. Part I. Observational aspects. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1976. Vol. 33. P. 1937–1954.
4. Meehl G. A. The annual cycle and interannual variability in the tropical Pacific and Indian Ocean regions. *Monthly Weather Review*. 1987. Vol. 115. P. 27–50.
5. Gill A. E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1980. Vol. 106. P. 447–462.
6. Indian monsoons under close scrutiny of scientists. URL: <https://courier.unesco.org/ru/articles/indiyskie-mussony-pod-pristalnym-vnimaniem-uchenykh> (дата звернення: 12.09.2024).
7. Максимов И. В. Зміна швидкості обертання Землі та баричне поле північної півкулі Землі. 1973. Т. 210, № 1. С. 67–70.
8. Peixoto J. P., Oort A. H. *Physics of Climate*. New York: American Institute of Physics, 1992. 520 p.
9. Сидоренков Н. С., Сумерова К. А. Геодинамічні причини декадних змін клімату. 2012. Вип. 348. С. 195–214.
10. Wang B. *The Asian monsoon*. Berlin: Springer, 2006. 787 p.
11. Holton J. R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 4th ed. – Amsterdam: Elsevier, 2004. 535 p.
12. Sarachik E. S., Cane M. A. *The El Niño–Southern Oscillation Phenomenon*. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 385 p.
13. Lambeck K. *The Earth's variable rotation: Geophysical causes and consequences*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. 449 p.
14. Hager B. H., Clayton R. W., Richards M. A., et al. Lower mantle heterogeneity, dynamic topography and the geoid. *Nature*. 1985. Vol. 313. P. 541–545.
15. Schott F. A., McCreary J. P. The monsoon circulation of the Indian Ocean. *Progress in Oceanography*. 2001. Vol. 51. P. 1–123.
16. Кучеренко Н. В., Томчаковський Г. Г., Капочкіна М. Б., Калініченко Є. В. Умови формування мусонного вітру над Індокіанською аномалією сили тяжіння. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. – Київ: ДУІТ, 2025. Вип. 1 (42). С. 115–130. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42>.
17. Томчаковський Г. Г., Капочкіна М. Б. Результати дослідження причин мусонного вітру над Індокіанською аномалією сили тяжіння. *Водний транспорт*. 2025. № 2 (43). С. 57–74. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.05>.
18. Blewitt G., Lavallée D., Clarke P., Nurutdinov K. A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected. *Science*. 2001. Vol. 294, No. 5550. P. 2342–2345. DOI: 10.1126/science.1065328.
19. AVISO+. Sea State and Wind Products [Electronic resource]. – Access mode: <https://seewater.aviso.altimetry.fr/#!&page=isv-mainPage> (date of access: 12.02.2026).

20. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://hpiers.obspm.fr/> (дата звернення: 12.09.2024).
21. Томчаковський Г. Г., Капочкіна М. Б., Калініченко Є. В. Дослідження мінливості «мусонної депресії» у Бенгальській затоці. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. – 2025. Вип. 51. С. 250–262. DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344961.
22. Колесник А. В., Доля В. Д., Кучеренко Н. В. Використання ГІС для вивчення причин формування мусонів Індійського океану. *Часопис картографії*. 2015. Вип. 12. С. 82–89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11 (дата звернення: 12.09.2024).
23. Бороздич Э. В. Влияние короткоживущих подкirkовых локальных збурень на літо-, гідро- та атмосферу. *Наукові читання з космонавтики та авіації*. Наука, 1990. С. 130–140.
24. Войтенко С. П., Учитель И. Л., Ярошенко В. Н., Капочкін Б. Б. Геодинаміка. Основи кинематичної геодезії. Одеса: Астропринт, 2007. – 259 с.
25. Учитель И. Л., Ярошенко В. Н., Капочкін Б. Б. Геодинаміка. Основи динамічної геодезії / під ред. С. П. Войтенко. Одеса: Астропринт, 2008. 311 с.
26. Новая парадигма аккумулятивного рельефоутворения у мелководных районах океанов та морів: монографія том 3 / Ігор Іванович Гладких, Маргарита Борисівна Капочкіна, Наталія Василівна Кучеренко, Борис Борисович Капочкін. Одеса: НУ «ОМА», 2021. 199 с.
27. Global Climate Report: 2010 [Електронний ресурс]. NOAA NCEI. Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/201013> (дата звернення: 12.09.2024).
28. India Meteorological Department. *Climate Change Assessment over India*. New Delhi: IMD, 2010
29. National Oceanic and Atmospheric Administration. *Global Climate Report – 2010*. NOAA; United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. *Pakistan Floods 2010: Situation Report*. UNOCHA
30. Bangladesh Meteorological Department. *Annual Climate Summary 2010*. Dhaka: BMD, 2011
31. El Niño and the record years 1998 and 2016 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.realclimate.org/index.php/archives/2017/11/el-nino-and-the-record-years-1998-and-2016/> (дата звернення: 12.09.2024).

Tomchakovsky G.G., Kucherenko N.V., Kapochkina M.B. THE SUMMER MONSOON VARIABILITY IN THE ARABIAN SEA

The paper analyzes the features of intraseasonal variability of surface waves in the Arabian Sea during the summer monsoon from the standpoint of ensuring navigation safety and efficiency of maritime transport. Based on the satellite altimetry observation data for 2010–2019, the statistical and spectral characteristics of wind speed and wave height, namely, the contribution of cyclical components, are studied. Special attention is paid to the analysis of short- and medium-term oscillations that form the intraseasonal structure of the wave field and determine the variability of sea conditions within one monsoon period. It is depicted that the maximum of storm activity can shift from August to June, which significantly complicates navigation planning in the Arabian Sea. Such a shift in peak wave activity values has important consequences for the organization of maritime transportation, since traditional ideas about seasonal dynamics may not correspond to the actual conditions of a particular year. It has been established that at different stages of the development of the summer monsoon, the process of wave regime formation under the influence of geophysical factors can be divided into the first stage (before the solstice date), when the cause precedes the effect, and the second phase (after the specified date), when wave conditions are formed in a self-sustaining mode. Such a two-phase structure of the wave process development allows for a more accurate interpretation of the mechanisms of interaction of atmospheric and oceanic factors and clarifies the understanding of the dynamics of the monsoon circulation. Additionally, it is demonstrated that the variability of wave characteristics has a complex spectral composition, which necessitates the use of complex approaches to analysis and forecasting. The results obtained emphasize the relevance of studying the intraseasonal variability of the summer monsoon in the Arabian Sea and taking into account adverse weather conditions to optimize maritime logistics and reduce risks for shipping. The practical significance of the work lies in the possibility of using the obtained dependencies to increase the accuracy of forecasting wave conditions, planning ship routes, and minimizing the impact of dangerous hydrometeorological phenomena on the functioning of maritime transport.

Keywords: summer monsoon, the Arabian Sea, intraseasonal variability, surface turbulence, storm activity, satellite altimetry, maritime logistics, maritime navigation, shipping safety, geophysical factors.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Фоменко Г.Р.

<https://orcid.org/0000-0001-8789-7575>

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

РОЗВИТОК РОЗУМНИХ МІСТ – ШЛЯХ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЖИТТЯ

Питання урбанізації територій представляють важливу проблему для розвитку суспільства та міських систем у більшості країн. У всьому світі міста стикаються з погрозами, які пов'язані із зростанням населення урбанізованих територій що підсилює дисбаланс в економічній, соціальній, екологічній сферах. У зв'язку з цим у дослідженнях звертають увагу на необхідність нових підходів до управління урбанізованими територіями, технологічною основою для яких є інновації у сфері цифрових технологій, штучного інтелекту, інноваційних методів. Сучасні інновації у цифрових технологіях підвищують ефективність функціонування міських систем, якість взаємодії місцевого населення із структурами управління, розробки інтелектуальних мереж, аналізу даних про стан різних об'єктів інфраструктури, навколишнього середовища, транспортної системи.

Розумне місто стає одним із найбільш привабливих напрямків для органів влади, які намагаються досягти мети сталого розвитку, підвищити ефективність управління і забезпечити компромісне прийняття рішень. В останній час у світі проекти впровадження цифрових технологій реалізовані у містах Європи, США, Азії. В основу концепції розвитку сучасних інноваційних міст покладено соціальний і технічний підхід, згідно з яким розумне управління у місті ґрунтується на поєднанні технічних рішень і інструментів публічної участі громадян в управлінні містом. Метою розумного міста є надання платформи для здійснення допомоги громадянам та обслуговування їх з'єднанням інфраструктури міста з інформаційно-комунікативними технологіями для отримання економічних, соціальних, правових та екологічних переваг. Успіх концепції – розумне місто залежить від координації діяльності різних відомчих установ, бізнесу, а також співтовариств.

В основі сучасного розвитку територій міст покладено питання їх стійкості, збалансованого розвитку, а також життєстійкості. Життєстійкість є характеристикою міста, що показує її здатність адаптуватися до нових умов і приходити в стан нормального функціонування після впливу негативних факторів. Надто важливим є питання життєстійкості міст у період військових дій в Україні. Для покращення умов життя на територіях міст, безумовно, необхідним є використання сучасних інформаційно-аналітичних систем, які здатні ефективно вирішувати екологічні проблеми і покращувати стан навколишнього середовища. Необхідно шукати рішення пов'язані із змінами навколишнього середовища і не менш важливими питаннями стабільного управління водними ресурсами. Збереження чистоти екосистеми є основою процесів розвитку і, безумовно покращення життя людей.

Ключові слова: розумні міста, інноваційні технології, інвестиції, управління, середовище, суспільство, інтеграція, штучний інтелект.

Постановка проблеми. Сучасні процеси, які спостерігаються в урбанізації територій представляють важливу проблему для розвитку суспільства та міських систем у більшості країн. У всьому світі міста стикаються з погрозами, які пов'язані із зростанням населення урбанізованих територій що підсилює дисбаланс в економічній, соціальній, екологічній сферах. У зв'язку з цим у дослідженнях звертають увагу на необхідність нових підходів до управління урбанізованими територіями, технологічною основою для яких

є інновації у сфері цифрових технологій, штучного інтелекту, інноваційних методів. Одним із напрямків розвитку територій є концепція розумного міста, яка передбачає вирішення проблем інтеграції фізичних, цифрових і соціальних систем місцевого населення.

Розумне місто є середовищем, яке сприяє підвищенню якості життя місцевого населення, дотримання принципів стійкого розвитку території. Сучасні інновації у цифрових технологіях підвищують ефективність функціонування міських

систем, якість взаємодії місцевого населення із структурами управління, розробки інтелектуальних мереж, аналізу даних про стан різних об'єктів інфраструктури, навколишнього середовища, транспортної системи. Необхідно відмітити, що розумне місто відрізняється рядом переваг, таких як орієнтація на потреби місцевого населення, екологічна безпека та ефективна система управління міським середовищем. Незважаючи на значну увагу до проблеми розвитку розумних міст, в теперішній час підтримка рішень розвинута недостатньо. Це ускладнено постійним збільшенням громадських потреб, а також значною нестачею доступних ресурсів. Важливою умовою по реалізації розумного розвитку є використання сучасних інструментів планування цифровізації міського простору [1, 2].

Тенденції в процесах управління містами все частіше базуються на тих, чи інших моделях управління. Основою особливості таких підходів є прагнення до досягнення ефективності, економії, впровадженні інноваційних рішень. Території відрізняються одна від одної, а з іншого боку, стикаються з подібними проблемами, що дає можливість пошуку рішень з цих проблем. У розвитку рішень питань розумного управління мають значення великі технологічні кампанії, які можуть запропонувати власні рішення по проблемам сучасних міст. В такому разі міські території можуть бути дослідницькими майданчиками та місцями тестування нових рішень. В такій ситуації розумні міста можливо розглядати, як системи в яких використовують дані отримані за допомогою інтелектуальних датчиків, розумних мереж для створення стійких міст. До основних принципів планування розвитку розумних міст можливо віднести принципи єдності, участі, безперервності, гнучкості та точності. Принцип єдності стосовно до планування розвитку розумного міста полягає в тому, що цілісна система компонентів розумного міста має розвиватися в єдиному напрямку. Принцип участі полягає в тому, що процес планування розумного міста повинен залучати до себе усі зацікавлені сторони з якими він спілкується. Принцип безперервності припускає, що процес планування є постійним і безперервним. Така ситуація стає можливою внаслідок об'єктивних обставин, які пов'язані із невизначеністю у зовнішньому середовищі. Принцип гнучкості полягає в тому, що у рамках процесів планування розвитку розумних міст має залишатися можливість у зміні напрямку розвитку за умов виникнення непередбачених ситуацій та обста-

вин. Принцип точності має на увазі, що процеси планування та розробки планів повинні бути максимально точними. Впровадження інноваційних технологій потребує зростання інвестицій у реалізацію нових проектів цифровізації міського середовища, а також залучення партнерів для сумісного інвестування у проекти розумних міст.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання урбанізації територій акцентують увагу на проблемах розумного і стійкого міського панування, яке покладено в основу розробок і реалізації концепції розумного міста. Створення розумного міста та використання інноваційних цифрових технологій спрямовані на покращення функціональності міського середовища, ефективності транспортних систем, залучення населення до вирішення проблем суспільства за допомогою цифрових платформ, питань життєстійкості, а також екологічних проблем розглядаються у роботах: Дамері Р., Гіл-Гарсія Л., Меллулі С., Болівара М., Кічкера Г., Мікелуччі Ф., Єршова О., Жукович Л., Приходько В., Чичкало-Кондракко І., Пушкар Т. та інші [1, 3-9]. У дослідженнях, які проводились авторами, поставлені актуальні проблеми питань підвищення якості життя громадян у розумних містах.

Постановка завдання. Метою даної статті є розгляд питань використання інноваційних цифрових технологій у розвитку розумних міст для покращення якості життя громадян.

Виклад основного матеріалу. В останні роки все більше уваги приділяється проблемам територіального розвитку відповідно принципам сталого розвитку. Використання цифрових технологій, як нового фактору розвитку територій, змінюють принципи формування міського простору. Визнаною стає думка, що використання цих інноваційних технологій сприяє підвищенню ефективності функціонування державного сектору і дозволяє громадянам отримати доступ до послуг більш високої якості. Досягнення в області технологій сприяють розширенню меж міст, які потребують покращення якості життя, створення розумних міст. Для вирішення актуальних питань і покращення якості життя розумне місто виникло, як соціальне прагнення у якому різні послуги надаються за рахунок об'єднання інформаційних і комунікаційних технологій з фізичною інфраструктурою та належним правовим регулюванням [1, 2, 9].

Розумне місто стає одним із найбільш привабливих напрямків для органів влади, які намагаються досягти мети сталого розвитку, підвищити

ефективність управління і забезпечити компромісне прийняття рішень.

В останній час у світі проекти впровадження цифрових технологій реалізовані у містах Європи, США, Азії. До кращих розумних міст за індексом IESE Cities in Motion Index у 2025 році увійшли: Цюрих (1), Осло (2), Женева (3), Дубай (ОАЕ, 4), Абу-Дабі (ОАЕ, 5), Лондон (6). Цюрих – лідер серед розумних міст, надає приклад ефективного управління, впровадження транспортної смарт-платформи, налагодження повної утилізації відходів, досягнення якості сервісного обслуговування. Осло – розроблена оцінка впровадження «зелених» рішень, розширення інклюзивної забудови, поширено використання електромобілів. Женева – впровадження інноваційних рішень в інфраструктурі, використання відновлюваної енергії, оптимізація енергоспоживання, контроль стану навколишнього середовища, використання цифрової екосистеми, розширення територій зелених насаджень. Дубай – розвинуто розвиток напрямків економічного управління, питань екологічного стану, покращення життя людей їх мобільність, розвиток транспортних конструкцій, а також заплановано до 2050 року використання 75 % чистої енергії. Абу-Дабі – впровадження інновацій у різних напрямках, таких як розумне освітлення, покращення трафіку руху, розширення паркування, впровадження цифрової платформи ТАММ, яка дозволяє зменшити використання паперу на 90 % для державних послуг, розвиток використання електромобілів і зарядних станцій. Лондон – впровадження цифрової модернізації транспорту, створення нових сервісів – від розумного паркування до системи моніторингу якості повітря, налагодження безперервного покриття 4G і 5G у метрополітені, досягнення низького рівня викидів – основа екологічної стратегії, моніторинг повітряного простору. Таким чином, наведені результати, які досягнуті у ведучих згідно рейтингу 2025 року, самих розумних міст світу. Необхідно відмітити, як ефективно реалізована велика кількість сучасних інноваційних технологій управління розвитку у сфері транспорту, енергозбереження, контролю повітряного середовища, спрямованих на підвищення якості життя людей [4, 6, 8, 10, 11].

Сучасне розумне місто визначене багатогранним, яке ґрунтується на його основних компонентах, починаючи від технічної інфраструктури і завершуючи механізмами соціального капіталу. До цього часу не існує єдиного визначення розумне місто, тому що законодавчо не закріплене.

В поширеному значенні розумне місто поєднують три елементи, а саме: технології, людей і інститути. Технологічний аспект включає інтелектуальні, віртуальні і інформаційні складові, а якість інформаційних і комунікаційних технологій має вирішальне значення для підтримки кращих практик розумного міста. Технологічні і інтелектуальні характеристики підкріплюються правовими, які визначають статут і правила реалізації концепції розумних міст.

В основу концепції розвитку сучасних інноваційних міст покладено соціальний і технічний підхід, згідно з яким розумне управління у місті ґрунтується на поєднанні технічних рішень і інструментів публічної участі громадян в управлінні містом. У зв'язку з цим, важливим є розвиток систем підтримки управління, сполученням цифрових рішень із соціальними аспектами сфери прийняття управлінських рішень. Розумне управління повинно бути заснованим на технологічній базі сучасних цифрових технологічних рішень, а також підтримувати ухвалення рішень з врахуванням особливостей міської території і соціальної специфіки. Ефективність системи публічного управління визначається її здатністю приваблювати і використовувати людський капітал у співробітництві між різними суб'єктами розумного міста за допомогою цифрових технологій. Розгляд питань публічного управління соціальних і економічних систем різного рівня, у тому числі між містами, свідчить про те, що важливим є перехід від простого використання цифрових рішень до розумного управління, яке засновано на участі, партнерстві, координації, організації зв'язків і відношень між структурами влади і іншими зацікавленими сторонами [1, 9, 12, 13]. У зв'язку з цим, зростає популярність екосистемного підходу в рамках якого процеси публічного управління вибудовують інтереси сторін: влади, бізнесу, населення, наукового суспільства. Таким чином, в процесі реалізації трансформації системи публічного управління повинні бути передбачені певні умови:

- спеціальні механізми виконання управлінських функцій кожним суб'єктом;
- онлайн-інструменти для висловлювання інтересів, прав і обов'язків в органах управління;
- механізми вирішення розбіжностей які виникають.

Публічне управління міською територією стає сумісною діяльністю по розвитку загальної інфраструктури, сприятливого середовища для підприємницької діяльності у підвищенні якості життя місцевого населення.

Метою розумного міста є надання платформи для здійснення допомоги громадянам та обслуговування їх з'єднанням інфраструктури міста з інформаційно-комунікативними технологіями для отримання економічних, соціальних, правових та екологічних переваг. Успіх концепції – розумне місто залежить від координації діяльності різних відомчих установ, бізнесу, а також співтовариств. Необхідно відмітити, що розумне місто це не тільки впровадження інноваційних технологічних досягнень, але і розуміння соціально-технічних, політико-правових проблем управління та громадської участі. Можливо виділити шість ключових аспектів, які впливають на процес розвитку розумного міста: спілкування міст, інновації у сфері послуг, формування партнерських відношень, ініціативність міст, інтеграція інфраструктури і управління розумним містом. Розвиток розумного міста обумовлений впровадженням нових інноваційних технологій з обов'язковим залученням до міських інновацій громадян [5, 10, 14-16]. Розумне місто знаходиться під значним впливом умов інвесторів, компаній які створюють нові підприємства для надання послуг, а також спостерігають за міськими системами. Також розумні міста надають нові можливості для бізнесу, спостерігають за деякими міськими системами. У зв'язку з цим потенційні переваги наприклад можуть включати наступне:

- зниження заторів на вулицях в результаті надання інформації про дорожній рух в даний час;
- інформацію про паркування;
- програму попередження злочинності і реагуванні на неї з використанням камер спостереження і датчиків;
- зниження витрат через витік при використанні моніторингу міських і водоочисних споруд;
- забезпечення громадян необхідною правовою допомогою в онлайн-режимі;
- налагодження механізмів оперативного зворотного зв'язку між місцевою владою і громадянами.

Сучасні інноваційні технології, використання штучного інтелекту значно змінюють принципи функціонування, створюють умови для розвитку нових підходів до управління складними інфраструктурними системами міських територій, соціальним середовищем та економікою міста. При цьому цифрова трансформація міст пов'язана із цілеспрямованим використанням технологій і даних для прийняття більш ефективних рішень і підвищення якості життя місцевого населення. Сучасний розвиток міської території на основі інноваційних рішень, реалізації ініціатив у процесах цифровізації міського середовища пов'язано

із формуванням екосистеми розумного міста до якої, частіш за все, окрім місцевої влади приєднуються і інші зацікавлені сторони, а саме представники бізнесу, місцевого населення, представників наукових закладів та засобів масової інформації.

Необхідно відмітити, що сучасне суспільство схильне до впливу різних викликів і погроз, що потребує розробки нових підходів до управління містами. В основі сучасного розвитку територій міст покладено питання їх стійкості, збалансованого розвитку, а також життєстійкості. Життєстійкість є характеристикою міста, що показує її здатність адаптуватися до нових умов і приходити в стан нормального функціонування після впливу негативних факторів. Надто важливим є питання життєстійкості міст у період військових дій в Україні. Використання інноваційних технологій досить можливо для підвищення ефективності використання ресурсів, створення умов по формуванню ефективної інфраструктури, що дуже важливо в умовах негативного впливу в період військових дій. Розвиток окремих компонентів розумного міста може підвищити надійність функціонування міських територій в таких складних умовах [10, 12, 14, 17-19]. Найактивніше втілення в Україні концепції розумних міст відбувається у Києві, Львові, Харкові та Дніпрі, а в 15 містах використовують концепцію із впровадженням деяких розумних рішень. В процесі вирішення питань стійкого розвитку необхідно розставляти пріоритети територіального розвитку, а ідеї життєстійкості направляти на пошук напрямків формування шляхів для відновлення та забудови територій міст. Надто важливим є вирішення екологічних, соціальних, економічних питань для покращення умов життя громадян.

Для покращення умов життя на територіях міст, безумовно, необхідним є використання сучасних інформаційно-аналітичних систем, які здатні ефективно вирішувати екологічні проблеми і покращувати стан навколишнього середовища. Вирішення питань екологічної безпеки можливе завдяки співробітництву із лідерами технологічного прогресу і пошук рішень подолання проблеми. Необхідно шукати рішення пов'язані із змінами навколишнього середовища і не менш важливими питаннями стабільного управління водними ресурсами. Збереження чистоти екосистеми є основою процесів розвитку і, безумовно покращення життя людей [7, 13, 15].

Використання сучасних інноваційних технологій і їх рішень у розвитку розумних міст спрямоване на забезпечення їх екологічної стійкості

шляхом інтеграції міської інфраструктури, що дозволить компаніям, які надають послуги, ефективно збирати, обробляти і контролювати різні види інформації для оптимізації потреб води та енергоресурсів. Важливо покращення спілкування між державним структурами для сумісного пошуку кращих інноваційних рішень, які будуть сприяти покращенню умов життя у розумних містах.

Висновки. Розвиток сучасних інноваційних цифрових технологій є важливим інструментом для покращення урбанізованих територій, ство-

рення розумних міст, які підвищують якість життя місцевого населення, а також спрямовані на вирішення існуючих проблем.

Розглянуті питання, які спрямовані на підвищення життєстійкості урбанізованих територій для різних сфер розвитку розумного міста.

Цифровізація розумних міст підкреслює потенціал для підвищення екологічної стійкості, дозволяє управляти ресурсами, оптимізувати їх витрати, створювати більш стійке середовище та покращувати якість життя громадян.

Список літератури:

1. Пушкар Т.А., Серьогіна Д.О., Михайлова К.В. Розвиток «розумних міст» в умовах цифрової трансформації. *Держава та регіони*. 2022. № 1. С.116-121. DOI: <https://doi.org/10.32840/1814-1161/2022-1-20>
2. Габрель М.М. Просторова організація містобудівних систем. Монографія. НАН України. Ін-т регіональних досліджень НАН. 2024. 400 с. ISBN 966-8613-00-7
3. Gil-Garcia J.R., Helbig N., Ojo A Being smart: Emerging technologies and innovation in the public sector. *Government Information Quarterly*. 2014. Vol. 31. P.11-18.
4. Kuecrer G.D., Hartley K. How smart cities became the urban norm: Power and mowledge in new Songdo City. *Annals of the American Association of Geographers*. 2020. Vol. 110. P. 516-524. <https://doi.org/10.1080/24694452.2019.1617102>
5. Michelucci F.V., Demarco A., Tanda A. Defining the Role of the smart City Manager: An Analysis pf Responsibilities and skills. *Journal of Urban Technology*. 2016. Vol.23. P.23-42.
6. Жукович І.А. Міжнародний досвід оцінювання та порівняння smart-міст. *Статистика України*. 2014. №2. С.16-22.
7. Приходько В.П., Єгорова О.О., Кропова А.С Розумне місто у процесах інноваційного розвитку європейського союзу: таргетування, ресурси та потенціал. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2019. № 24. С.53-59. URL: http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/24_3_2019ua/12.pdf
8. Чичкало-Кондрацька І.Б., Буряк С.А., Кондрацька Д.С. Особливості створення та перспективи розвитку Smart cities у країнах світу. *Ефективна економіка*. 2020. № 8. С.81-88. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.8.9
9. Ковалівський С.В. Обґрунтування трансформації механізмів публічного управління в контексті цілей сталого розвитку. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2019. № 3. С. 1-8. <https://doi.org/10.32702/2307-2156-2021.3.32>
10. Захарова О.В., Бабіч І.В. Європейський досвід переходу до технологій розумних міст в умовах інформаційної економіки. *Наук. журнал «Розвиток міста»*. 2024. Вип.2(02). С.130-135. DOI:10.32782/city-development.2024.2-16
11. Monachesi P. Shaping an alternative smart city discourse through twiter: Amsterdam and the role of creative migrants, *Cities*. 2020. Vol. 100. P.102-122. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102664>
12. Jiag H., Geertman S., Witte P. A sociotechnical framework for smart urban governance: Urban technological innovation and urban governance in the realm of smart cities. *International Journal of E-Planning Research*. 2020. Vol. 9. P.1-19. DOI:10.4018/IJEPR.2020010101
13. Meijer A., Thaens M. Quantified street: Smart govor nance of urban sofety. *Information Polity*. 2018. Vol. 23. P.29-41. <https://doi.org/10.3233/IP-170422>
14. Олійник Л.В. Економічна ефективність технологій «Smart city». *Економіка і організація управління*. 2020. № 38. С.55-67. DOI: <https://doi.org/10.31558/2307-2318.2020.2.5>
15. Chanq V. An ethical framwork for big date and smart cities. *Technological Forecast ting and Social Change*. 2021. Vol. 165. P. 120-126. DOI:10.1016/j.techfore.2020.120559
16. Dameri R. The conceptual idea of Smart City: University, Industry and Government Vision. *Smart City Implementation*. Berlin. Springer International Publishing. 2017. P.22-43.
17. Zhan C., de jong M. Financind eco csties and low carbon cities: The case of Shenzhen International Low Carbon City. *Journde of Cleaner Production*. 2018. Vol. 180. P. 116-125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.097>
18. Сагайдак М.П. Стратегічне управління розбудовою розумних міст (Smart city) в Україні у післявоєнний період. *Світ фінансів*. 2024. № 4(81). С.102-114. DOI: 10.35774/SF2024.04.102
19. Ruhlandt R.W. The governance of smart cities: Asystematie literature review. *Cities*. 2018. Vol. 81. P.1-23. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.02.014>

Fomenko H.R. THE DEVELOPMENT OF SMART CITIES – A PATH TO A BETTER LIFE

The issue of urbanization poses a significant challenge to the development of society and urban systems in most countries. Around the world, cities face threats linked to population growth in urban areas, which exacerbates imbalances in the economic, social, and environmental spheres. In this regard, research highlights the need for new approaches to managing urbanized areas, with a technological foundation based on innovations in digital technologies, artificial intelligence, and innovative methods. Modern innovations in digital technologies enhance the efficiency of urban systems, improve the quality of interaction between local residents and administrative bodies, facilitate the development of smart networks, and enable the analysis of data on the condition of various infrastructure facilities, the environment, and the transportation system.

Smart cities are becoming one of the most attractive areas of focus for government authorities seeking to achieve sustainable development goals, improve administrative efficiency, and ensure consensus-based decision-making. Recently, digital technology implementation projects have been carried out in cities across Europe, the United States, and Asia. The concept of developing modern innovative cities is based on a social and technical approach, according to which smart city management relies on a combination of technical solutions and tools for public citizen participation in city governance. The goal of a smart city is to provide a platform for assisting citizens and serving them by connecting the city's infrastructure with information and communication technologies to achieve economic, social, legal, and environmental benefits. The success of the smart city concept depends on the coordination of activities among various government agencies, businesses, and communities.

The modern development of urban areas is based on issues of sustainability, balanced development, and resilience. Resilience is a characteristic of a city that reflects its ability to adapt to new conditions and return to normal functioning after being affected by negative factors. The issue of urban resilience is particularly important during the period of military hostilities in Ukraine. To improve living conditions in urban areas, it is undoubtedly necessary to utilize modern information and analytical systems capable of effectively addressing environmental issues and improving the state of the environment. It is necessary to seek solutions related to environmental changes and the equally important issues of sustainable water resource management. Preserving the purity of the ecosystem is the foundation of development processes and, undoubtedly, the improvement of people's lives.

Keywords: *smart cities, innovative technologies, investment, governance, environment, society, integration, artificial intelligence*

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 621.31:621.383

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/44>**Макаренко В.В.**<https://orcid.org/0000-0003-1232-5198>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЗВ'ЯЗАНИХ КОТУШОК ІНДУКТИВНОСТІ В DC/DC-ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ЕНЕРГІЇ

Широке використання перетворювачів постійної напруги в постійну в промисловості, системах резервування і перетворення енергії і в системах інтернету речей вимагає пошуку шляхів підвищення ефективності таких пристроїв. Одним з таких напрямків при побудові багатofазних та понижувально/підвищувальних DC/DC-перетворювачів є використання зв'язаних котушок індуктивності. Результати наведені в багатьох дослідженнях демонструють високу ефективність запропонованих рішень. Однак відсутні дані які б дозволили порівняти ефективність роботи перетворювачів зі зв'язаними та не зв'язаними котушками індуктивності. В статті наведені моделі DC/DC-перетворювачів створені в середовищі LTspice. Розглянуті перетворювачі з двома котушками індуктивності: двофазний понижувальний та понижувально/підвищувальний SEPIC та ZETA. Дослідження залежності коефіцієнта корисної дії (ККД) від струму навантаження проведено при використанні зв'язаних та не зв'язаних котушок індуктивності. При використанні зв'язаних котушок отримані результати співпадають з даними наведеними в джерелах інформації. Результат моделювання роботи двофазного DC/DC-перетворювача показав, що ефект підвищення ККД спостерігається при зміні струму навантаження в діапазоні від 0,05 до 0,5 від максимального струму. При інших значеннях струму використання зв'язаних котушок ефекту не дає. Результати моделювання перетворювачів SEPIC та ZETA в різних режимах показали що зв'язані котушки індуктивності дозволяють підвищити коефіцієнт корисної дії в обмеженому діапазоні струмів навантаження. Для перетворювачів SEPIC та ZETA використання зв'язаних котушок ефективно при роботі зі струмом навантаження до 0,2 від максимального струму навантаження перетворювача та при незначних змінах струму навантаження в процесі роботи. На основі проведених дослідів сформувано висновки та рекомендації по використанню зв'язаних котушок індуктивності в DC/DC-перетворювачах постійної напруги з двома котушками.

Ключові слова: DC/DC-перетворювач, зв'язані котушки, ефективність, коефіцієнт корисної дії, модель, моделювання.

Постановка проблеми. Проблема підвищення енергоефективності електронних пристроїв стає все більш актуальною на тлі дефіциту електроенергії. Особливо актуальними питання енергоефективності є для автономних систем Інтернету речей, які повинні працювати без заміни джерел живлення на протязі тривалого часу. При використанні DC/DC-перетворювачів для живлення потужних пристроїв це може дати вигоду в коефіцієнті корисної дії (ККД) до 14%, що забезпечує суттєву економію енергії, як показали в своїй

роботі Чон-Піл Лі, Хонньон Ча, Донгсул Шин, Кьонг-Джун Лі, Донг-Вук Ю та Джі-Юн Ю [1].

Джефф Фалін в своїх роботах [2, 3] показав, що для малопотужних і мініатюрних пристроїв до проблеми високої ефективності додається проблема мініатюризації. При використанні DC/DC-перетворювачів з двома котушками індуктивності, а саме двофазних понижувальних та понижувально/підвищувальних, побудованих за топологіями SEPIC та ZETA, можна підвищити їх ефективність використовуючи зв'язані котушки індуктивності [1-3]. Однак оцінити ефект

від використання таких котушок неможливо із-за відсутності в цих роботах даних про ефективність таких перетворювачів при відсутності зв'язку між котушками.

Питання доцільності використання зв'язаних котушок індуктивності, враховуючи їх більш складну конструкцію та більшу вартість, може бути вирішена шляхом порівняння ефективності перетворювачів зі зв'язаними та не зв'язаними котушками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В своїй роботі Дідар Чіфтчі, Арда Акилдіз, Баті Ерен Ергюн, Мехмет Онур Гюльбахче [4] показали, що використання зв'язаних котушок дозволяє не тільки підвищити ККД перетворювача, а і знизити пульсації струму через котушки і зменшити рівень електромагнітних завад. Однак наведені дані тільки для перетворювача зі зв'язаними котушками. Вільмар Мартінес, Джун Імаока, Юкі Іто, Масайосі Ямамото та Казухіро Уметані [5] запропонували в своїй роботі підвищувальний перетворювач зі зв'язаними котушками, що забезпечує більш високий коефіцієнт перетворення у порівнянні з перетворювачем з котушками без зв'язку. Однак відсутня інформація про ефективність такого перетворювача.

Скьявон Г. Л., Агостіні Е. – молодший, Насіменто К. Б. [6] в своїй роботі запропонували перетворювач з великим коефіцієнтом перетворення зі зв'язаними котушками індуктивності. Однак ефективність перетворювача не вказана. У роботі Цзявей Ляна, Лян Вана, Мінфань Фу, Джунруй Ляна і Хаою Вана [7] показано, що використання зв'язаних котушок у потужних перетворювачах може призвести до зниження максимальної щільності потужності, хоча і призводить до збільшення коефіцієнта перетворення напруги при високій ефективності перетворювача. Даних про ефективність перетворювача не наведені.

У роботі Буая Д.О. та Колар Дж.В. [8] показано, що при використанні зв'язаних котушок індуктивності у перетворювачах потужністю 10 кВт можуть бути зменшені габарити вихідного фільтру, але відсутні інформація про ефективність такого перетворювача.

Робота Венькан Хуана [9] присвячена питанням проектування зв'язаних котушок індуктивності і особливостям вимірювання їх параметрів і тому питання ефективності перетворювачів не розглядалися. В роботі Мохаммад Гаффарпура, Реза Ебрагімі, Хоссейн Мададі Коджабаді, Лючен Чанга та Хосеп М. Герреро [10] запропоновано модифікований DC/DC-перетворювач зі

зв'язаними котушками, який має високий коефіцієнт перетворення напруги при малих значеннях тривалості робочого циклу. Показано, що максимальний ККД такого перетворювача досягає значення 95,8%, однак відсутнє порівняння з випадком використання не зв'язаних котушок.

В дисертації Ван П. [11] наведені результати випробування двофазного перетворювача зі зв'язаними котушками для дата центрів. Наведені залежності ККД перетворювача при різній потужності у навантаженні при різних значеннях вхідної напруги. Показано, що максимальний ККД сягає 96,5%, однак аналогічних результатів при використанні окремих котушок не наведено.

Підвищувальний перетворювач для роботи з сонячними панелями, запропонований Скьявон Г. Л., Агостіні Е. – молодшим та Насіменто К. Б. [12], забезпечує при використанні зв'язаних котушок максимальний ККД 96,9%. Але відсутні порівняння з аналогічним перетворювачем без використання зв'язаних котушок.

Перетворювач, запропонований в роботі Лян Ченя, Дешенг Ронга та Сюаньцзін Суна [13], при використанні трьох зв'язаних котушок забезпечує максимальний ККД 96,2% при вихідній потужності 90 Вт. Дослідження такого перетворювача без зв'язаних котушок відсутнє.

Але у згаданих вище роботах не проводився порівняльний аналіз ефективності DC/DC-перетворювачів зі зв'язаними та не зв'язаними котушками індуктивності. Актуальною задачею є визначення чи завжди використання більш складних і більш дорогих зв'язаних котушок індуктивності виправдано і наскільки більшим стає ККД перетворювачів при їх використанні.

Постановка завдання. Метою статті є порівняння ефективності DC/DC-перетворювачів при використанні зв'язаних та не зв'язаних котушок індуктивності шляхом імітаційного моделювання.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. На основі експериментальних даних, отриманих при дослідженні DC/DC-перетворювачів у [1-3] побудувати моделі DC/DC-перетворювачів реалізованих за різними топологіями.
2. Дослідити ефективність DC/DC-перетворювачів при зміні струму навантаження.
3. Дослідити діапазон зміни вхідної напруги при використанні зв'язаних та не зв'язаних котушок індуктивності.
4. Зробити висновки про доцільність використання зв'язаних котушок при різних умовах експлуатації DC/DC-перетворювачів.

Виклад основного матеріалу. Оскільки тільки в [1, с. 346] наведені порівняльні результати роботи понижувального двофазного перетворювача в режимі постійної тривалості робочого циклу, то ці результати можна використати для формування моделі перетворювача з еквівалентними параметрами. Це дозволить дослідити DC/DC-перетворювач в режимі з постійною вихідною напругою. В перетворювачі [1] при зміні потужності в навантаженні змінюється в широких межах вихідна напруга, що не характерно для нормального режиму роботи DC/DC-перетворювачів.

На рис. 1 наведена модель двофазного DC/DC-перетворювача, створена в середовищі LTspice. Для перевірки відповідності моделі параметрам перетворювача з роботи [1, с. 346] коефіцієнт зв'язку між котушками задано $K = 0,927$, відношення тривалості імпульсу керування до тривалості періоду (Dutycycle) $D = t_i/T = 0.5$, індуктивність котушок $L_1 = L_2 = 2,93$ мГн, частота перемикачів – 20 кГц.

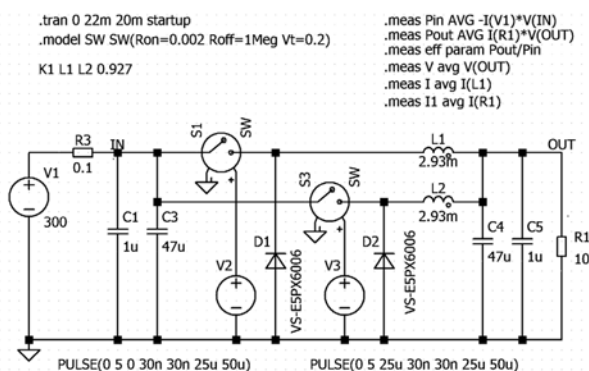


Рис. 1. Модель двофазного перетворювача

Для аналізу коефіцієнта корисної дії (ККД) використані директиви моделювання:

- .meas Pin AVG -I(V1)*V(IN) – розрахунок споживаної від джерела живлення потужності;
- .meas Pout AVG I(R1)*V(OUT) – розрахунок вихідної потужності;
- .meas eff param Pout/Pin – розрахунок ККД.

Для виводу результатів вимірювання вихідної напруги та струму використані директиви:

- .meas V avg V(OUT) – вимірювання середнього значення вихідної напруги;
- .meas I avg I(L1) – вимірювання середнього значення струму через котушку індуктивності;
- .meas I1 avg I(R1) – вимірювання середнього значення вихідного струму.

В результаті моделювання виміряна і обчислена інформація виводиться в файл SPICE Output Log:

pin: AVG(-I(V1)*V(IN))=2593.97242847 FROM 0 TO 0.002

pout: AVG(I(R1)*V(OUT))=2532.60799401 FROM 0 TO 0.002

eff: Pout/Pin=0.976343451542

v: AVG(V(OUT))=159.14164445 FROM 0 TO 0.002

i: AVG(I(L1))=7.95476183847 FROM 0 TO 0.002

i1: AVG(I(R1))=15.9141644385 FROM 0 TO 0.002

Порівнюючи отриманий в результаті моделювання ККД = 97,6% можна зробити висновок про відповідність параметрів моделі результатам отриманих в роботі [1]. Результат моделювання наведений на рис. 2.

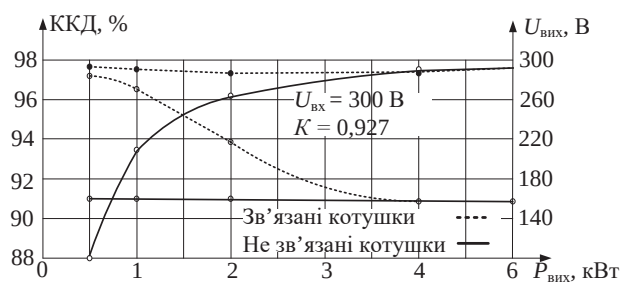


Рис. 2. Залежність ККД і напруги на виході двофазного DC/DC-перетворювача від вихідної потужності

Режим роботи при фіксованому значенні $D = 0.5$ не характерний для роботи DC/DC-перетворювачів і тому всі експерименти в подальшому проводились при формуванні постійного значення вихідної напруги. Для досягнення такого результату змінювалась тривалість робочого циклу D .

Для порівняння ефективності DC/DC-перетворювача при використанні не зв'язаних котушок індуктивності коефіцієнт зв'язку в моделі встановлюється рівним нулю – K1 L1 L2 0.

Як випливає з рис. 2 при досягненні вихідної потужності ≥ 4 кВт вихідна напруга перетворювача зі зв'язаними і не зв'язаними котушками стає однаковою і ККД теж співпадає. Тобто при таких дослідженнях неможливо порівнювати ефективність перетворювача при використанні зв'язаних і не зв'язаних котушок.

Тому для порівняльного аналізу проведено дослідження залежності ККД від струму навантаження при постійній напрузі на виході перетворювача. Для дослідження використана модель наведена на рис. 1, а постійна напруга на виході підтримувалась зміною тривалості робочого циклу D . Результати аналізу наведені на рис. 3.

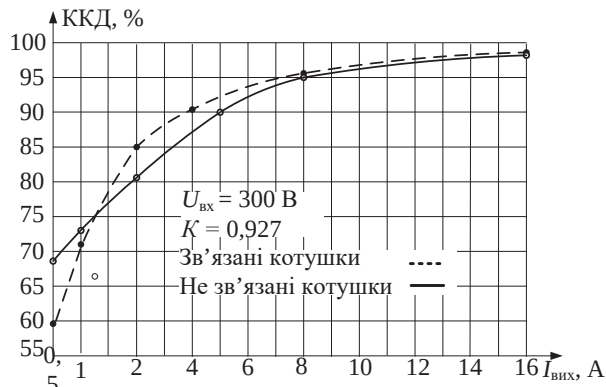


Рис. 3. Залежність ККД двофазного DC/DC-перетворювача від струму навантаження

З рис. 3 випливає, що при малих струмах навантаження (менше 1 А) суттєво більший ККД перетворювача з не зв'язаними котушками, а при струмах більше половини від максимального використання зв'язаних котушок не дає переваг в ККД перетворювача. В діапазоні вихідного струму від 0,1 до 0,5 від максимального ККД перетворювача зі зв'язаними котушками може перевищувати ККД перетворювача з не зв'язаними котушками на величину до 5%.

Дані наведені у [2, с. 23] дозволяють створити модель перетворювача SEPIC з еквівалентними параметрами. Для розрахунку параметрів котушки індуктивності використані еквівалентні [1] параметри вхідної напруги – 9 В в режимі підвищення напруги і 12 В в режимі пониження напруги. Частота комутації як і в [1] обрана рівною 1 МГц. Оскільки в [1] максимальний вихідний струм складав всього 0,3 А, то для аналізу у більш широкому діапазоні вихідних струмів задано значення максимального струму 5 А.

Розрахунок значення індуктивності котушки здійснюється за формулою [14, с. 4]:

$$L = \frac{U_{\text{вх}} \cdot (U_{\text{вих}} - U_{\text{вх}})}{0,4 I_{\text{вих.макс}} \cdot U_{\text{вх}}^2 \cdot f_k} = \frac{9^2 \cdot (12 - 9)}{0,4 \cdot 5 \cdot 12^2 \cdot 10^6} = 8,43 \text{ мкГн.}$$

де $U_{\text{вх}}$ – вхідна напруга перетворювача, $U_{\text{вих}}$ – вихідна напруга перетворювача, $I_{\text{вих.макс}}$ – максимальний вихідний струм, f_k – частота комутації силового ключа.

З урахуванням рекомендацій [2, с. 18] значення індуктивності зв'язаних котушок у два рази менше за розраховані для не зв'язаних котушок. Тому для реалізації моделі обрана котушка WE-DD SMT ShieldedCoupledInductor744874004 компанії Würth Elektronik з індуктивністю 4,7 мкГн (найближче до розрахованого значення). Опір постійному струму котушки 0,028 Ом, струм насичення 8 А,

допустима напруга 80 В, частота власного резонансу 20 МГц, коефіцієнт зв'язку 0,995 [15].

Модель перетворювача SEPIC наведена на рис. 4.

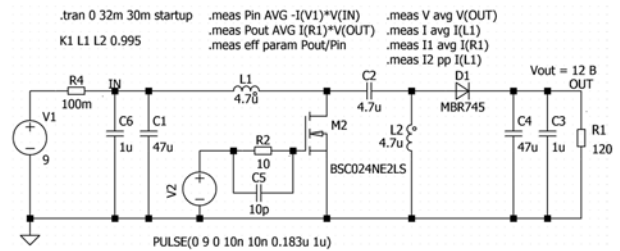


Рис. 4. Модель перетворювача SEPIC зі зв'язаними котушками індуктивності

Результати моделювання роботи перетворювача SEPIC в підвищувально/понижувальному режимах наведені на рис. 5.

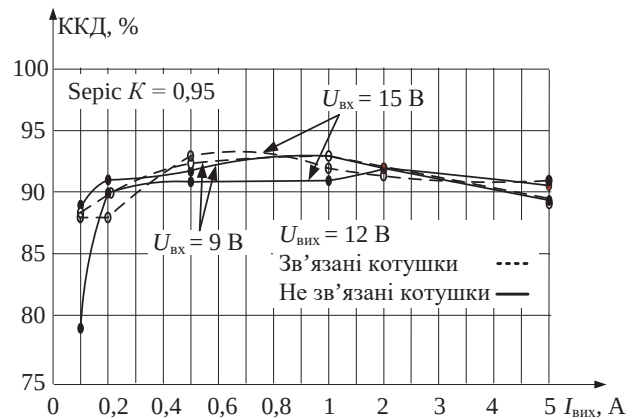


Рис. 5. Залежність ККД DC/DC-перетворювача SEPIC від струму навантаження

Як випливає з рис. 5, отримані результати в діапазоні зміни струму навантаження 0,1...0,4 А (при використанні зв'язаних котушок індуктивності) збігаються з результатами отриманими в [2]. Поза межами цього діапазону при роботі в підвищувальному режимі ККД перетворювача зі зв'язаними та не зв'язаними котушками змінюється однаково. При роботі в понижувальному режимі ККД перетворювача зі зв'язаними котушками перевищує ККД перетворювача з не зв'язаними котушками при зміні струму навантаження від 0,4 до 1,5 А максимум на 3%. При більших значеннях струму навантаження ККД збігається, а при струмі менше 0,2 А ККД перетворювача з не зв'язаними котушками стрімко спадає, в той час як при використанні зв'язаних котушок зменшення ККД набагато менше. Це дозволяє зробити висновок про те, що при роботі

в понижувальному режимі при малих струмах навантаження перетворювач зі зв'язаними котушками має значні переваги, а при максимальних струмах навантаження ці переваги зникають.

Модель понижувально/підвищувального перетворювача ZETA з параметрами еквівалентними параметрам перетворювача наведеного в [3] наведена на рис. 6. Оскільки частота комутації ключа у цьому перетворювачі була встановлена 200 кГц, то для моделі використана котушка індуктивності WE-DD SMT Shielded Coupled Inductor 7448709100 компанії Würth Elektronik з індуктивністю 10 мкГн (найближче доступне значення до розрахованого значення). Опір постійному струму котушки 0,033 Ом, струм насичення 8 А, допустима напруга 80 В, частота власного резонансу 20 МГц, коефіцієнт зв'язку 0,995 [15].

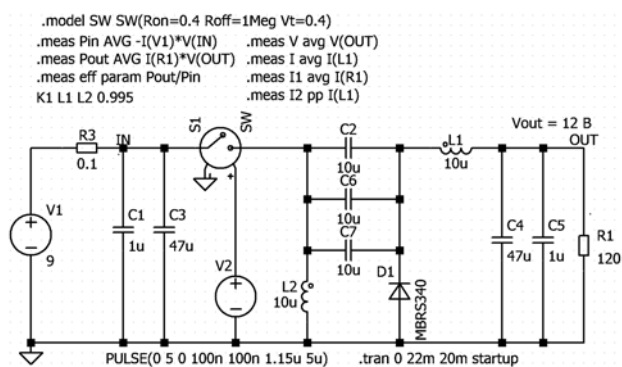


Рис. 6. Модель перетворювача ZETA зі зв'язаними котушками індуктивності

Результати моделювання роботи перетворювача ZETA в понижувально/підвищувальному режимі наведені на рис. 7.

Отримані результати моделювання при струмі навантаження до 1 А дуже близькі до результатів наведених в [3]. З рис. 7 випливає, що при роботі в понижувальному режимі, при струмах до 0,2 від максимального значення, ККД перетворювача зі зв'язаними котушками не тільки більше ККД перетворювача без зв'язаних котушок, але і практично не змінюється при зміні струму навантаження. При роботі в підвищувальному режимі, при струмі навантаження до 0,2 від максимального, використання зв'язаних котушок дозволяє

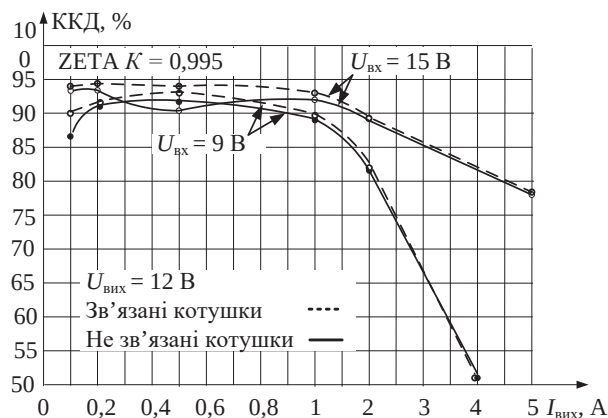


Рис. 7. Залежність ККД DC/DC-перетворювача ZETA від струму навантаження

збільшити ККД не більше ніж на 1%. При струмі більше ніж 0,2 від максимального, ККД перетворювачів зі зв'язаними та не зв'язаними котушками практично співпадають.

Висновки. З отриманих при моделюванні результатів випливає, що ефект підвищення ККД при використанні зв'язаних котушок індуктивності в DC/DC-перетворювачах з двома котушками індуктивності проявляється у досить вузькому діапазоні зміни струму навантаження. Якщо перетворювач працює в широкому діапазоні зміни струму навантаження, то використання зв'язаних котушок може бути недоцільним. При роботі зі сталим навантаженням підвищення ККД перетворювача зі зв'язаними котушками може бути суттєво більшим у порівнянні з використанням не зв'язаних котушок. При побудові малопотужних перетворювачів в межах 100...200 Вт можна використати зв'язані котушки що випускаються провідними виробниками. А при більших значеннях вихідної потужності необхідно конструювати котушки, що призводить до збільшення витрат та часу на проектування. Тому доцільно при виборі конструкції котушок індуктивності провести моделювання потрібного перетворювача перш ніж здійснювати вибір.

Додатковою перевагою використання зв'язаних котушок є збільшення коефіцієнта перетворення напруги. Однак для кожного типу перетворювача ці значення суттєво відрізняються.

Список літератури:

1. Jong-Pil Lee, Honnyong Cha, Dongsul Shin, Kyoung-Jun Lee, Dong-Wook Yoo, and Ji-Yoon Yoo. Analysis and Design of Coupled Inductors for Two-Phase Interleaved DC-DC Converters. *Journal of Power Electronics*, 2013, V. 13, № 3. P. 339-347.
2. Jeff Falin. Designing DC/DC converters based on SEPIC topology. *Analog Applications Journal*. 2008, № 4. P. 18-23.
3. Jeff Falin. Designing DC/DC converters based on ZETA topology. *Analog Applications Journal*. 2010, № 2. P. 16-21.

4. Didar Ciftci, Arda Akyildiz, Bati Eren Ergun, Mehmet Onur Gulbahce. A Comparative Study for Interleaved Boost Converter with Coupled/Uncoupled Inductors. *2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. 2023. Bursa, Turkiye. DOI: 10.1109/ELECO60389.2023.10415927.
5. Wilmar Martinez, Jun Imaoka, Yuki Itoh, Masayoshi Yamamoto and Kazuhiro Umetani. Analysis of Coupled-Inductor Configuration for an Interleaved High Step-Up Converter. *9th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia: "Green World with Power Electronics", ICPE 2015-ECCE Asia*. 2015. P. 2241-2248. DOI: 10.1109/ICPE.2015.7168088.
6. Schiavon, G.L.; Agostini, E., Jr.; Nascimento, C.B. Quasi-Resonant Single-Switch High-Voltage-Gain DC-DC Converter with Coupled Inductor and Voltage Multiplier Cell. *Energies* 2023, 16. P. 59-72. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16093874>.
7. Jiawei Liang, Liang Wang, Minfan Fu, Junrui Liang, and Haoyu Wang. Overview of Voltage Regulator Modules in 48 V Bus-Based Data Center Power Systems. *CPSS transactions on power electronics and applications*. 2022. V. 7, № 3. P. 283-299. DOI: 10.24295/CPSSSTPEA.2022.00026.
8. Boillat D. O., Kolar J. W. Modeling and Experimental Analysis of a Coupling Inductor Employed in a High Performance AC Power. *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2012)*, Nagasaki, Japan. P. 1-18. DOI: 10.1109/ICRERA.2012.6477401.
9. Wenkang Huang. High-density multiphase DC-DC converter with integrated coupled inductor. *Dissertation Doctor of Philosophy in the field of Electrical Engineering*. Northeastern University Boston, Massachusetts, 2017. 144 P. URL: <https://repository.library.northeastern.edu/files/neu:cj82q865p/fulltext.pdf> (дата звернення 23.03.2026).
10. Mohammad Ghaffarpour, Reza Ebrahimi, Hossein Madadi Kojabadi, Liuchen Chang, Josep M. Guerrero. Novel high voltage gain DC-DC converter with dynamic analysis. *IET Power Electronics*. 2021. P. 562-583. DOI: 10.1049/pel2.12028
11. Wang P. High-Efficiency and High-Power-Density DC/DC Converters for Data Center Application. Technical University of Denmark. 2024. 197 P. URL: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/c02c1591-e676-4b53-a446-76b6b40625c7> (дата звернення 23.03.2026).
12. Schiavon, G.L.; Agostini, E., Jr.; Nascimento, C.B. Quasi-Resonant Single-Switch High-Voltage-Gain DC-DC Converter with Coupled Inductor and Voltage Multiplier Cell. *Energies*. 2023, 16, 3874. P. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16093874>.
13. Liang Chen, Desheng Rong, Xuanjin Sun. A Family of High Step-Up Soft-Switching Integrated Sepic Converter With Y-Source Coupled Inductor. *IEEE Access*. 2023. V. 11. P. 111752 – 111764. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3322459.
14. Brigitte Hauke. Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage. URL: https://www.ti.com/lit/an/slva372d/slva372d.pdf?ts=1748658582286&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (дата звернення 23.03.2026).
15. WE-DD SMT Shielded Coupled Inductor. URL: <https://www.we-online.com/en/components/products/WE-DD#744877220> (дата звернення 23.03.2026).

Makarenko V.V. EFFICIENCY ANALYSIS OF THE USE OF COUPLED INDUCTIVE COILS IN DC/DC POWER CONVERTERS

The widespread use of DC-to-DC converters in industry, energy backup and conversion systems, and Internet of Things systems requires finding ways to increase the efficiency of such devices. One of these directions in the construction of multiphase and step-down/step-up DC/DC converters is the use of coupled inductors. The results given in many studies demonstrate the high efficiency of the proposed solutions. However, there is no data that would allow us to compare the efficiency of converters with coupled and uncoupled inductors. The models of DC/DC converters presented in the article were created in the LTspice environment. Considered converters with two inductors: two-phase buck and buck/boost SEPIC and ZETA. The study of the dependence of the efficiency factor (Efficiency) on the load current was carried out using coupled and uncoupled inductors. When using connected coils, the obtained results coincide with the data given in the sources of information. The result of the simulation of the operation of the two-phase DC/DC converter showed that the effect of increasing the efficiency is observed when the load current changes in the range from 0.05 to 0.5 of the maximum current. At other current values, the use of connected coils has no effect. The simulation results of SEPIC and ZETA converters in different modes showed that connected inductors allow to increase the efficiency in a limited range of load currents. For SEPIC and ZETA converters, the use of coupled coils is effective when operating with a load current up to 0.2 of the maximum load current of the converter and with minor changes in the load current during operation. On the basis of the conducted experiments, conclusions and recommendations on the use of coupled inductance coils in DC/DC converters of constant voltage with two coils were formed.

Keywords: DC/DC converter, coupled coils, efficiency, efficiency factor, model, simulation.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Відомості про авторів

Авдєєва О.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Алфімов Є.Б. – магістр, провідний інженер-електрик і системний інженер Інституту проблем математичних машин і систем Національної академії наук України

Баранюк О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бармін О.Є. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри матеріалознавства Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Беднарська І.С. – доктор філософії, асистентка кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Борець І.В. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій і систем Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Бугрова Т.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки та телекомунікацій Національного університету «Запорізька політехніка»

Вільшанюк М.С. – старший викладач кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Волошко Т.П. – старший викладач кафедри транспортних технологій Сумського національного аграрного університету

Гайдай Г.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Гільдєєв Д.О. – аспірант кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Гіренко Н.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри професійної освіти, ресторанного і туристичного бізнесу Державного закладу «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»

Головіна О.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобільного транспорту Філії Класичного приватного університету у місті Кременчук

Грешнов А.Ю. – доцент кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Грудініна Г.С. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та електроустаткування Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Гуржій С.В. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Дворжак В.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механічної інженерії Київського національного університету технологій та дизайну

Дроменко В.Б. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Еюбова К. – PhD кафедри енергетики Мінгечевірського державного університету, Азербайджан

Єсєв А.І. – старший викладач кафедри судових енергетичних установок і систем

Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

Єфіменко О.В. – начальник відділу калібрувань засобів вимірювальної техніки Департаменту метрологічного забезпечення Філії «Центр метрології та газорозподільних систем» Публічного акціонерного товариства «Національна акціонерна компанія «Нафтогаз України»

Жук М.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Залюбовський М.Г. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри механічної інженерії Київського національного університету технологій та дизайну

Казарєзов А.Я. – доктор технічних наук, професор, заступник завідувача відділу Миколаївського науково-дослідного експертно-криміналістичного центру МВС України

Казимиренко Ю.О. – доктор технічних наук, доцент, завідувачка кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Капочкіна М.Б. – кандидат технічних наук, доцент кафедри навігації та управління судном Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету

Катін П.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кириллова В.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

Кириллова О.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

Клименко В.М. – аспірант кафедри турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Коваленко Н.О. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри конструкції повітряних суден, авіаційних двигунів та підтримання льотної придатності Української державної льотної академії

Коваль М.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету

Колодненко В.М. – старший викладач кафедри транспортних технологій Сумського національного аграрного університету

Кравченко П.О. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Кравчук С.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Крамаренко Д.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Кучеренко Н.В. – кандидат географічних наук, доцент, провідний науковий співробітник Науково-дослідного центру Збройних Сил України «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

Лавріщев О.О. – викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Житомирського агротехнічного фахового коледжу

Лішук С.Р. – доктор філософії

Логачова Л.М. – старший викладач кафедри радіотехніки та телекомунікацій Національного університету «Запорізька політехніка»

Логвінов Г.С. – викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Житомирського агротехнічного фахового коледжу

Макаренко В.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Макисько О.Р. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри процесів та апаратів харчової інженерії Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького

Мандрика А.Г. – PhD, молодший науковий співробітник кафедри технології неорганічних речовин та екології Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Мисов О.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Українського державного університету науки і технологій

Мішин О.В. – аспірант кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мовчан К.О. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Морщавка С.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки та телекомунікацій Національного університету «Запорізька політехніка»

Нестеренко М.Б. – аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нестерко А.Б. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергосистем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ничеглод В.В. – доктор філософії, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

Новосилецький Ю.Л. – викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Житомирського агротехнічного фахового коледжу

Онисько А.І. – кандидат військових наук, доцент, доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Онищенко С.П. – доктор економічних наук, професор, професор кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Павлова Н.Л. – кандидат технічних наук, доцент, директор навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

Перетятко Ю.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Півторак Г.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Пікенін О.О. – старший викладач кафедри космічної інженерії Навчально-наукового інституту аерокосмічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Подиман Г.С. – доктор філософії, старший викладач кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проценко О.Р. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Рачинський А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Решетіло С.О. – здобувач вищої освіти кафедри транспортних технологій Сумського національного аграрного університету

Решетков Д.М. – кандидат технічних наук, професор кафедри управління портовою і сервісною діяльністю на водному транспорті Одеського національного морського університету

Рубанка М.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механічної інженерії Київського національного університету технологій та дизайну

Рудасьов В.Б. – кандидат технічних наук, доцент, викладач циклової комісії автомобілів та транспортних технологій Відокремленого структурного підрозділу «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки Українського державного університету науки і технологій»

Руденко В.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Сумського національного аграрного університету

Румянцева М.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології Українського державного університету науки і технологій

Савченко М.А. – здобувач вищої освіти кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Українського державного університету науки і технологій

Салтиков Д.Ю. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри прикладної і комп'ютерної радіофізики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Самойлик С.С. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки та телекомунікацій Національного університету «Запорізька політехніка»

Середа С.С. – здобувач вищої освіти магістерського рівня Харківського національного університету радіоелектроніки

Скиба М.Б. – аспірант кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Скоlecь С.С. – аспірант кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Смірнов Д.О. – аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Сокол Г.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Соколова О.Є. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій і систем Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Стратонов В.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри пошуку, рятування та спеціальної фізичної підготовки Української державної льотної академії

Судаков Є.В. – аспірант кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Таценко О.В. – старший викладач кафедри транспортних технологій Сумського національного аграрного університету –

Томчаковський Г.Г. – старший викладач кафедри навігації і керування судном Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету

Тортіка Д.М. – аспірант кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

Троценко Є.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Усатий О.П. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Ушаков Д.Р. – аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Фоменко Г.Р. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Фролов О.О. – молодший науковий співробітник кафедри технології неорганічних речовин та екології Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Фролова Л.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Чорнобородов М.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки та телекомунікацій Національного університету «Запорізька політехніка»

Юніс Б.Н. – кандидат технічних наук, доцент кафедри міцності літальних апаратів Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут»

Якубовський О.М. – кандидат технічних наук, доцент, викладач циклової комісії автомобілів та транспортних технологій Відокремленого структурного підрозділу «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки Українського державного університету науки і технологій»

Яценко Д.В. – аспірант кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ящук Л.Б. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій Черкаського державного технологічного університету

НОТАТКИ

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 37 (76) № 3 2026

Частина 2

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 32,63. Ум. друк. арк. 38,61.

Зам. № 0526/412. Наклад 150 прим.

Дата розміщення онлайн: 19.05.2026. Дата друку: 26.05.2026

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.